De natuurkunde van 't vrije veld. Deel III

Rust en beweging

Marcel Minnaert

bron
Marcel Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld. Deel III. Rust en beweging*. W.J. Thieme, Zutphen 1942 (tweede druk)

Zie voor verantwoording: http://www.dbnl.org/tekst/minn004natu03_01/colofon.htm



Voorwoord

Met deze derde bundel is 'de Natuurkunde van't Vrije Veld' voltooid, in de vorm zoals ik het werk oorspronkelijk bedoeld had. In zekere zin is dit laatste boek het meest fundamentele van het geheel. Meer nog dan in de vorige delen wordt een beroep gedaan op de aktieve medewerking van den lezer, die slechts door het heerlijke werk in de open lucht de volle spanning en schoonheid van vele der metingen zal genieten. Wat u in handen heeft is dus niet alleen een boek over de Natuur, het is tevens een werkprogramma: aan vrijwel elk der beschreven verschijnselen valt nog te onderzoeken en ontdekkingsvreugde te beleven! De onderwerpen die ik tot een geheel heb samengesmeed zijn aan zo geheel verschillende gebieden ontleend, dat het mij niet mogelijk was die alle volledig te beheersen; men gelieve tekortkomingen in technische details te vergeven terwille van de eenheid in de gedachtengang.

Juist in deze dagen moge 'de Natuurkunde van 't Vrije Veld' velen weer dichter bij de Natuur brengen. Elke frisse dronk uit deze onuitputtelijke bron maakt ons lichaam sterker, onze gedachten reiner, ons leven gelukkiger.

M. MINNAERT.

Augustus 1940.

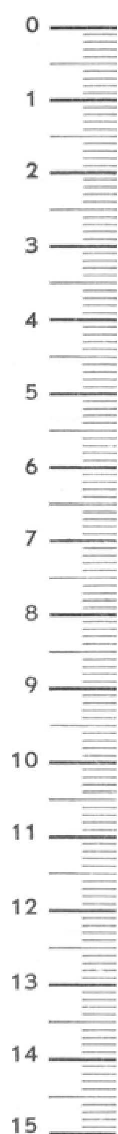
Bij de tweede druk.

Vooral het hoofdstuk *Sport en Spel* is op vele plaatsen aangevuld: turnen, zwemmen, zeilen, skisport zijn besproken. Tot mijn vreugde is het gelukt, *het physische onderzoek van de grondsoorten* met zeer eenvoudige middelen uit te voeren. Tal van kleinere wijzigingen en aanvullingen zijn overal aangebracht, dikwijls naar aanleiding van mededelingen der lezers, die ik voor hun belangstelling zeer dankbaar ben. Professor Dr. A.D. Fokker lichtte mij voor omtrent het tolprobleem en Prof. Dr. J.M. Burgers gaf kostbare raad inzake de aërodynamica.

M. MINNAERT.

Juli 1942.

De Natuurkunde van 't Vrije Veld
III. Rust en beweging


0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

Schatten en meten.

Gij hebt alles geordend naar maat, getal en gewicht.
Wijsheid van Salomo, XI, 20.

Bij de beschrijving van een natuurverschijnsel hebben we weinig aan woorden zoals ‘groot’ of ‘klein’, ‘snel’ of ‘langzaam’, ‘licht’ of ‘zwaar’. Duidelijker en welsprekender zijn getallen. Overal waar het mogelijk is, zullen we trachten met onze eenvoudige middelen nauwkeurige metingen te doen; meer dan eens echter zullen we ons tevreden moeten stellen met onzekere schattingen, die toch hun nut kunnen hebben. Een juist gevoel voor de grootte der dingen is van onschatbare waarde bij het maken van ontwerpen, bij het bedenken van natuurkundige theorieën, bij het fantaseren over de materie ....

1. Het schatten der lengten.

Op de bladzijde hier tegenover staat een centimeterschaaltje. Onthoud volgende maten:
de *span*, afstand tussen de toppen van duim en pink, ongeveer 22 cm;
de *el*, lengte van uw arm, ongeveer 70 cm;
uw eigen lengte;
de afmetingen van een Nederlandse briefkaart: 9 cm × 14 cm;

dubbeltje	1,5 cm
kwartje	1,9 cm
gulden	2,8 cm
rijksdaalder	3,8 cm.

Bij voetmarsen tellen we eens en vooral hoeveel stappen we moeten doen om van een hektometersteen tot de volgende te lopen, zoveel mogelijk hierbij de normale stap houdend waaraan we gewoon zijn; later kunnen we dan onbekende afstanden schatten door de stappen uit te tellen. Men kan ook oefenen hoe men stappen moet zó dat iedere stap met 1 meter overeenkomt: dit is de meest gebruikte methode voor kleine afstanden.

Een prachtig middel om grote afstanden nauwkeurig te meten hebben we in de fiets. We beginnen met te bepalen hetgeen wij de 'trapafstand' noemen: de afstand waarover de fiets vooruit gaat als de trappers één maal ronddraaien[1]. Dit doen we, door langs een rechte weg te rijden, en te tellen hoeveel omwentelingen de rechter (of linker) pedaal maakt tussen twee hektometerstenen; of beter nog: tussen twee kilometerstenen. Bij de eerste steen telt men: '*nul*'; dus 0, 1, 2, 3 ....; zodat als men ophoudt het getal tot hetwelk men gekomen was meteen het afgelegde aantal omwentelingen aangeeft. De bepaling is zo nauwkeurig, dat men gemakkelijk het verschil vindt tussen de faktor bij hard opgepompte banden en bij zachte achterband (bij mijn fiets: 5,20 m ± 0,01 en 5,13 m ± 0,01, als uiterste waarden). Kleine afwijkingen van de rechte lijn spelen bijna geen rol, ze veroorzaken slechts 'cosinusfoutjes', en ze herhalen zich bij latere metingen vrijwel op dezelfde wijze. Wanneer men nu onbekende afstanden in pedaalomwentelingen uittelt, hoeft men geen grotere fout te maken dan ½ of ¼ omwenteling; samen met de niet nauwkeurig bekende slapte van de band veroorzaakt dit een fout van slechts weinige meters op een kilometer, allicht minder dan 1%.

Grote afstanden tussen goed kenbare punten worden op de stafkaart bepaald, gebruik makend van de aangegeven schaal.

> Schat de afstand van een huis, van een boom; fiets of loop er naar toe en controleer of de schatting goed was.
> Bepaal welke van twee wegen de kortste is om ergens te komen.
> Als u eens de kettingkast van uw fiets heeft opengemaakt, maak er dan gebruik van om het aantal tanden te tellen van het pedaalwiel en van de achternaaf en vermenigvuldig de omtrek van het achterwiel met die verhouding; het produkt moet overeenstemmen met onze 'trapafstand'.

Vul de trapafstand van uw fiets hier in! [ ]

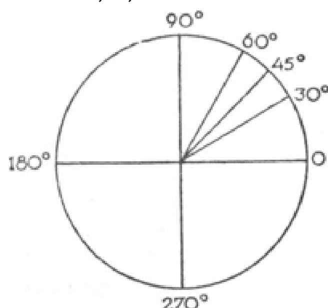
2. Het schatten van hoeken.

Hoe groot is de volle Maan? - Veel mensen zeggen: 'zo groot als een soepbord' of 'zo groot als een dubbeltje'! Dat heeft natuurlijk geen zin: het is duidelijk dat de Maan zover

1) Dit is wat men soms in de dagelijkse taal 'versnelling' noemt. Den natuurkundige rijzen hierbij echter de haren te berge! Wat hij versnelling noemt is iets geheel anders. - In de techniek wordt soms ook 'versnelling' genoemd: de aequivalente middellijn in Engelse duimen van het wiel dat met één omwenteling de fiets even ver vooruit zou brengen als een volle omwenteling der trappers dit in werkelijkheid doet; gewoonlijk 28 duim × aantal tanden van het kettingwiel / aantal tanden van de naaf.

verwijderd is, dat een bord of een dubbeltje op die afstand geheel onzichtbaar zouden zijn; de sterrekundigen weten, dat de Maan vele duizenden kilometers groot is.

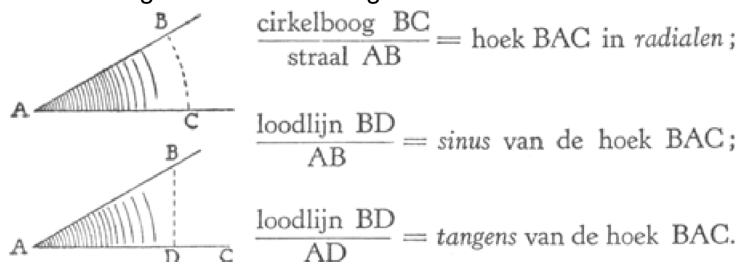
Neem echter een dubbeltje en hou het op armafstand: het bedekt ruimschoots de maanschijf. Een soepbord op 25 meter van ons oog zou ze ook bedekken. Wat we dus rechtstreeks kunnen aangeven is *de hoek* waaronder we de maansmiddellijn zien: ongeveer een halve graad, of een honderdste radiaal[1)]. Deze laatste maat is vooral nuttig voor kleine hoeken; 0,01 rad betekent:



1 cm gezien op 100 cm afstand; of 2 cm op 200 cm; of 10 cm of 1000 cm; enz.

Hier volgen enkele manieren om een hoek vast te leggen, zoals iedereen ze zich nog wel uit zijn schoolwiskunde herinnert! (fig. 1).

De rechte hoek telt 90 *graden*.
Elke graad telt 60 boogminuten.
Elke boogminuut telt 60 boogsekunden.



Voor kleine hoeken is bij benadering:
hoek in radialen = sinus = tangens = 0,0175 × hoek in graden.

Nu enkele eenvoudige hulpmiddelen bij het meten en schatten van hoeken in 't vrije veld!

a. Schat eens de hoogten van sterren zonder enig hulpmiddel. Bepaal daartoe eerst het punt recht boven uw hoofd, het *zenith*;

1) De juiste waarde is: 31'5" (gemiddeld). De zon zien we toevallig onder vrijwel dezelfde hoek als de maan,nml. 31'59" = 1/108; haar middellijn is wel vele malen groter, maar ze staat net evenveel malen verder van ons af.

keer u om en zie of u het dan nog op dezelfde plaats zoudt aanwijzen. Bepaal nu de hoogte 45°, dan 22° en 67°, enz. Er is een neiging om het hoofd niet genoeg achterover te buigen en de verschillende richtingen steeds te laag aan te wijzen (I, § 116); vermijd dit! Een goed waarnemer maakt geen fouten groter dan 3°.[1)]

b, We strekken de arm recht voor ons uit, en spreiden de vingers van de hand zo ver mogelijk uiteen. Dan ziet ons oog tussen de top van de duim en die van de pink een hoek van ongeveer 20° ('een spanne'). - Houd met gestrekte arm een

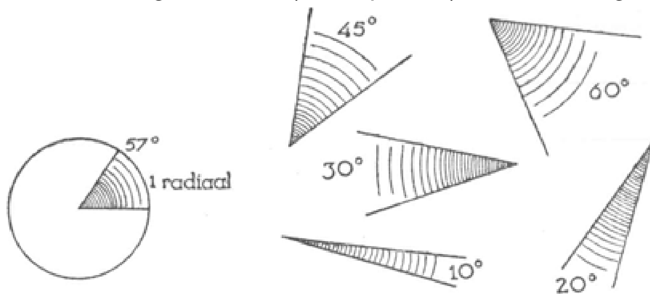


Fig. 1. Hoeken.

latje loodrecht op uw blikrichting en meet (in cm) hoe groot de afstand *a* schijnt te zijn tussen de twee beschouwde punten: de hoek bedraagt dan ongeveer *a* graden, althans indien onze arm ongeveer 57 cm lang is. Een nauwkeuriger bepaling verkrijgt men, door bij zichzelf de afstand latje - oog precies te meten.

Een Arabisch scheepskapitein bepaalde nog in 1836 de hoogte der sterren met de vier vingers der hand, tegen elkaar aan gelegd en op armafstand gehouden (8°). De gebroeders Schlagintweit hebben nog op die wijze sterhoogten geschat op hun ontdekkingsreizen in de 19e eeuw.

'Als aan de Jordaan een man op 't vlakke veld op zijn rug gaat liggen, zijn knieën opricht en zijn vuist met rechtopstaande duim daarop zet, dan is de Poolster op die hoogte te zien, zo hoog en niet hoger'[2)] - Bij mij bedraagt deze hoek 31°½, als ik het hoofd zover ophef tot ik met de hand bij mijn knieën

1) A.A. Nijland, A.N. **160**, 258, 1902. - Deze schattingen, bewerkt volgens de methode der 'cirkels van Sumner', zijn voldoende om de aardrijkskundige lengte en breedte te berekenen met een fout van ten hoogste 2°.

2) Fr. Schmidt, Geschichte d. geod. Instrum. u. Verfahren blz. 338 (1935).

Hoek in graden	Hoek in radialen	Sinus	Tangens	Hoek in graden	Hoek in radialen	Sinus	Tangens
0	0,000	0,000	0,000	46	0,803	0,719	1,036
1	,017	,017	,017	47	,820	,731	1,072
2	,035	,035	,035	48	,838	,743	1,111
3	,052	,052	,052	49	,855	,755	1,150
4	,070	,070	,070	50	,873	,766	1,192
5	,087	,087	,087	51	,890	,777	1,235
6	,105	,105	,105	52	,908	,788	1,280
7	,122	,122	,123	53	,925	,799	1,327
8	,140	,139	,140	54	,942	,809	1,376
9	,157	,156	,158	55	,960	,819	1,428
10	,175	,174	,176	56	,977	,829	1,483
11	,192	,191	,194	57	,995	,839	1,540
12	,209	,208	,213	58	1,012	,848	1,600
13	,227	,225	,231	59	1,030	,857	1,664
14	,244	,242	,249	60	1,047	,866	1,732
15	,262	,259	,268	61	1,065	,875	1,804
16	,279	,276	,287	62	1,082	,883	1,881
17	,297	,292	,306	63	1,100	,891	1,963
18	,314	,309	,325	64	1,117	,899	2,050
19	,332	,326	,344	65	1,134	,906	2,145
20	,349	,342	,364	66	1,152	,913	2,246
21	,367	,358	,384	67	1,169	,920	2,356
22	,384	,375	,404	68	1,187	,927	2,475
23	,401	,391	,424	69	1,204	,934	2,605
24	,419	,407	,445	70	1,222	,940	2,747
25	,436	,423	,466	71	1,239	,946	2,904
26	,454	,438	,488	72	1,257	,951	3,078
27	,471	,454	,510	73	1,274	,956	3,271
28	,489	,470	,532	74	1,292	,961	3,487
29	,506	,485	,554	75	1,309	,966	3,732
30	,526	,500	,577	76	1,326	,970	4,011
31	,541	,515	,601	77	1,344	,974	4,331
32	,559	,530	,625	78	1,361	,978	4,705
33	,576	,545	,649	79	1,379	,982	5,145

34	,593	,559	,674	80	1,396	,985	5,671
35	,611	,574	,700	81	1,414	,988	6,314
36	,628	,588	,726	82	1,431	,990	7,115
37	,646	,602	,754	83	1,449	,992	8,144
38	,663	,616	,781	84	1,466	,994	9,514
39	,681	,629	,810	85	1,484	,996	11,43
40	,698	,643	,839	86	1,501	,998	14,30
41	,716	,656	,869	87	1,518	,999	19,08
42	,733	,669	,900	88	1,536	,999	28,64
43	,750	,682	,932	89	1,553	1,000	57,29
44	,768	,695	,966	90	1,571	1,000	
45	,785	,707	1,000				

komen kan; breedte van de Jordaan: 32° tot 33° (Deze goede overeenstemming is natuurlijk toevallig!).

c. Ga op armafstand van een ruit staan en zet twee inktstipjes op het glas, die voor u de twee voorwerpen precies bedekken waartussen de hoek te meten is (met één oog waarnemen!). De afstand der stipjes gedeeld door de afstand oog - ruit is de gevraagde hoek in radialen. - Of: prik twee spelden in het raamkozijn en ga zover achteruit tot ze de twee voorwerpen bedekken.

d. Prik drie spelden A, B,

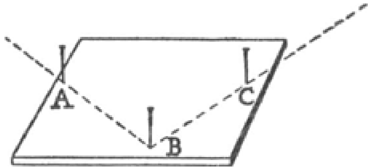


Fig. 2. Het meten van hoeken met drie spelden en een plankje.

C in een plankje of in een briefkaart, zó dat de gezichtslijnen BA, BC de te meten hoek afbakenen (fig. 2). Het plankje moet vast opgesteld zijn, op een tafel liggen of tegen een boom gespijkerd zijn. Trek daarna de lijnen BA, BC, en meet hun hoek met een gradenboog.

e. Twee latten, de ene van 1 meter lengte, de andere loodrecht daarop bevestigd; in deze laatste spijkers of spelden op vaste afstanden van elkaar (fig. 3). Houd deze soort hark met

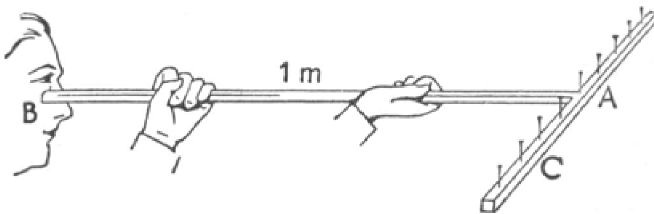


Fig. 3. Het meten van hoeken met twee onderling loodrechte latten.

de steel B tegen uw jukbeen gedrukt; als nu de spijkers A en C de twee beschouwde punten schijnen te bedekken, is AC/BA de tangens van de gevraagde hoek, dus voor kleine hoeken tevens de hoek in radialen. Als bv. AC=7 cm is AC/BA = 0,07 rad = 4°.

f. Bij al de vorige methoden doet zich altijd het bezwaar voor, dat het oog niet tegelijk scherp kan instellen op het voorwerp in de verte en op het meettoestel vlak bij het oog. Dit

bezwaar wordt bij de volgende methode vermeden.[1] Kijk met het éne oog naar het voorwerp waarvan u bijvoorbeeld de breedte in hoekmaat wilt meten. Houd vlak voor het andere een vergrootglas, en bekijk daarmee een millimeterschaaltje. Na een ogenblik oefening bent u staat beide ogen tegelijk open te houden, en u ziet het vergrote beeld der millimeterstrepen gesuperponeerd op het voorwerp zweven; als u 't schaaltje op de juiste afstand achter het vergrootglas houdt, zijn beide tegelijk scherp. Lees af hoeveel millimeters door het voorwerp bedekt worden; voor niet te grote hoeken geldt:

$$\frac{\text{aantal bedekte millimeters}}{\text{brandpuntsafstand der lens in mm}} = \frac{\text{voorwerp}}{\text{afstand oog—voorwerp}} = \text{gezichtshoek in radialen.}$$

Bij deze meting moet men zijn gewone bril blijven ophouden; de lens moet een brandpuntsafstand van 5 cm tot 15 cm hebben. Men doet enkele contrôleproeven om uit te maken welke afstand als ‘brandpuntsafstand’ in rekening gebracht moet worden, willen de bepalingen goed uitkomen (invloed van twee sterk verschillende ogen, accomodatie, enz.).

g. *Duimregel*. - De ogen van de meeste mensen staan op een afstand van ongeveer 6,5 cm van elkaar; als men de arm vóór zich uitstrekt en de duim omhoog steekt, is die op een afstand van ongeveer 6,5 cm van de ogen, dus toevallig 10 maal de oogafstand. Het ene oog ziet dan de duim een verwijderd voorwerp A bedekken, het andere oog een voorwerp C; met een weinig oefening kan men beide ogen open houden, en ziet dan de duim *tegelijk* tegenover de twee voorwerpen. We weten dus, dat we de lijn AC onder een hoek van 1/10 rad = $5^{\circ},7$ zien; die lijn is 10 maal haar eigen lengte van ons oog verwijderd.

h. *Telefoonpaalmethode*[2]. Voor het bepalen van hoogten ϑ boven de gezichteinder kiest men een geschikte hoge paal en loopt zo ver achteruit tot zijn top nauwkeurig in de richting van het te meten verschijnsel is gekomen. Men meet hoever men zich van de paal heeft moeten verwijderen (*a*), deelt door de hoogte *h* van de paal boven het oog, en heeft aldus tg $\vartheta = h/a$. Is de hoogte *h* niet bekend, dan leidt men die af door een hemellichaam te meten dat op een bekende hoekafstand boven de

1) Vgl. Soret, Arch. sc. phys. nat. **21**. 21, 1889.
2) M. Pinkhof, Hemel en Dampkring, **37**, 141, 1939.

kim staat. - In plaats van een paal is ook de gevel van een huis bruikbaar.

i. Voor het meten van hoogten boven de kim is er nog een eenvoudig hulpmiddeltje dat een nauwkeurigheid van 0,5^o geeft.[1)] Neem een rechthoekig stuk karton, prik daarin een gaatje C, en laat daardoor een draad CM hangen, op een of andere wijze bezwaard en als schietlood dienend (fig. 4). De

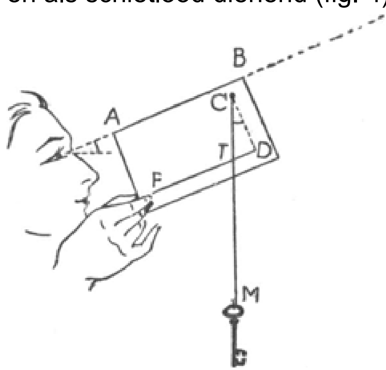


Fig. 4. Het meten van hoeken met plankje en schietlood.

waarnemer richt de zijde AB nauwkeurig naar de boomtop waarvan de hoogte gemeten wordt, zwenkt het karton even, zodat de slinger eerst vrij hangt en dan zacht tegen het karton aandrukt. Op het karton zijn de lijnen CD ⊥ AB en DF // AB getrokken, de eerste liefst 10 cm lang, de laatste in cm en mm verdeeld (het kan bv. een reepje millimeterpapier zijn). De hoek DCM is gelijk aan de hoek van AB met het horizontale vlak; hij is af te lezen op een papieren graadboog die we op ons karton geplakt hebben of uit zijn tangens TD/CD te berekenen.

Men kan ook een plankje nemen met een spijker C en een eenvoudig viziertje langs de zijde AB bevestigen.

j. Een zeer fraai instrument kan vervaardigd worden uit een gradenboog, die men voorziet van een vizier AB, en met een schroef vastklemt aan een stok met punt, welke stevig in de grond gestoken wordt (fig. 5). Men leest de stand van het schietlood op de gradenboog af, en vindt aldus rechtstreeks de hoek; eens en vooral is gecontroleerd, dat het schietlood wel bij 0 hangt als de vizierlijn op de gezichtseinder gemikt is. Merk op dat het viseren nauwkeuriger gaat als men het oog op enige afstand van het vizier A houdt: men ziet het dan scherper.

1) Science, **66**, 507, 1927. De beroemde Harvard-sterrewacht heeft een dergelijk toestelletje in de vorm ener eenvoudige briefkaart aan haar vrijwillige meteoor-waarnemers gestuurd.

k. Met een ouderwets fotografietoestel dat nog van een matglas voorzien is, kan men zeer nauwkeurig hoeken bepalen tot een 30-tal graden. Om bv. de hoogte van een torenspits boven de gezichteinder te meten, plaatst men de camera waterpas op een statief of op een tafel, zodat

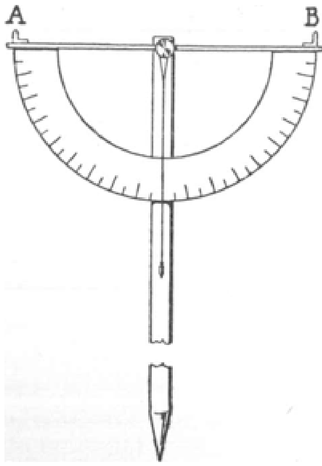


Fig. 5. Het meten van hoeken met gradenboog en vizier.

de kim in het centrum van het matglas afgebeeld wordt; men stelt in op ∞, en meet op het matglas de afstand *a* tussen torenspits en gezichteinder. Dan is $a/f = \mathrm{tg}\vartheta$, met f = de brandpuntsafstand van het toestel, die meestal op de vatting van de lens geschreven staat. De meting op het matglas is alleen mogelijk bij camera's voor platen, niet bij een filmcamera. Maak een opname van het tafereel en meet die uit: dan is de hoek tevens voor later vastgelegd.

l. Kijk heel even vluchtig naar de zon (gevaarlijk! met de oogleden knippen!). U ziet nu verscheidene kleine ronde nabeeldjes, die zich overal op aftekenen waar u de blik op richt (I, § 93). De middellijn van zulk een schijfje komt overeen met een hoek van 32' (= iets meer dan ½ graad).

Zie ook § 4.

Schat allerlei hoeken, eerst zonder hulpmiddelen, dan met onze primitieve methoden: de hoogte in hoekmaat van een toren, een huis, een boom, de zon; de hoekafstand tussen twee sterren; de straal van de kleine kring om de maan (I, § 141). In de drie laatste gevallen is een nauwkeurige contrôle op uw metingen mogelijk, zodat de fout bepaald kan worden. De hoogte van de poolster moet gelijk gevonden worden aan de aardrijkskundige breedte van onze waarnemingsplaats. - Schat de hoek waaronder u een mens in de verte ziet en bereken zijn afstand uit de ongeveer bekende hoogte.

3. Het schatten van hellingen.

De onervaren waarnemer schat de stijging van het terrein altijd te groot! Een spoorweg helt zelden meer dan 1%; op de lijn Sittard - Herzogenrath komt 1:70 voor. Een weg die 10% stijgt is al moeilijk met de fiets te berijden. De steilste duinhellingen, die de indruk van bijna loodrechte wanden

maken, vormen slechts een hoek van 40° met de gezichteinder.
Schat op welke afstand

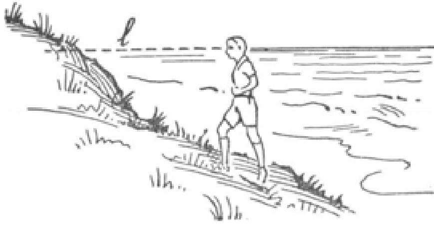


Fig. 6. Het schatten van hellingen.

l uw blik het stijgende terrein treft, als hij zo goed mogelijk horizontaal gericht wordt, dus op de hoogte van de gezichteinder; de hoogte van uw oog boven de grond, gedeeld door de afstand *l*, geeft de tangens van de hellingshoek en de stijging in procenten (fig. 6).

4. Het schatten der breedte van een rivier.

Kies een bepaald merkteken A aan de overkant, en stel u daar tegenover in B. Loop

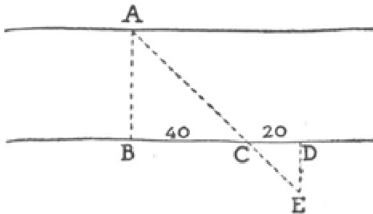


Fig. 7. Het schatten van de breedte van een rivier.

40 stappen langs de oever tot in C, en laat dan een steen vallen; loop nog 20 stappen tot in D. Als u nu loodrecht op de oever loopt, tot u in E bent, waar u de punten A en C in dezelfde richting ziet, is de afstand DE de helft van de breedte der rivier. - Tel alles in passen, en reken daarna om in meters (§ 1).

> Bewijs waarom dit zo is! Hoe wordt het als voor BC en CD andere waarden gekozen zijn?

5. Hoogte van een boom (huis, toren, uitzichtstoren, enz.).

Ik moet bekennen dat ik lange tijd zeer onduidelijke voorstellingen heb gehad van de hoogte van bomen, van 'een 10 meter-hoog huis'. De volgende middeltjes, die de houtvesters voor hoogtebepaling gebruiken, helpen verrassend goed om ons tekort aan ervaring op dit gebied aan te vullen.[1)]

a. Om de hoogte te schatten, *denkt* men de boom naar rechts of naar links omgevallen, en vraagt zich af waar de top dan, een kwart cirkel beschrijvend, op de grond zou terechtkomen; van op enige afstand is dit vrij goed te zeggen. De afstand van

1) Bij U. Müller, Lehrbuch der Holzmesskunde (Berlin 1923), staan er 48 methoden om de hoogte van een boom te bepalen!

dit punt tot aan de voet van de boom telt men in stappen uit.[1)]

b. Zet op de hoogte van uw oog een merkteken op de boomstam. Ga ongeveer zóver van de boom als u denkt dat hij hoog is; om dit te controleren, houdt u een stok met uitgestrekte

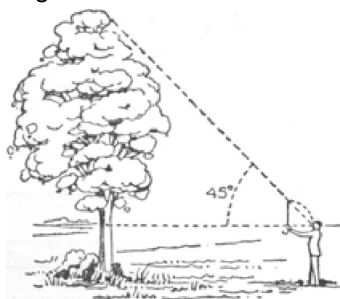


Fig. 8. Het schatten der hoogte van een boom met de 45°-methode.

arm zó, dat zijn uiteinde uw oog raakt; dan laat u dit uiteinde een kwart cirkel beschrijven tot de stok loodrecht omhoog is gericht, daarbij de arm zo weinig mogelijk verroerend. De gezichtslijn van het oog naar het bovenste uiteinde van de stok stijgt dus onder een hoek van 45°; men gaat achteruit tot die lijn de top van de boom precies treft, terwijl het onderste uiteinde steeds in de richting van het merkteken wordt gezien (fig. 8). De afstand waarop men zich nu van de stam bevindt is de gezochte hoogte, mits men er nog de hoogte van het merkteken bij optelt.[2)]

c. Een stok *ac*, liefst ongeveer 80 cm lang, aan het onderste

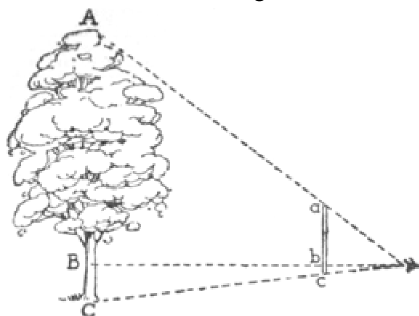


Fig. 9. Het schatten van de hoogte van een boom met de 10-delige schaal.

eind waarvan het 10e deel zijner lengte gemerkt is (*b*), wordt los in de hand gehouden zodat hij loodrecht neerhangt, en wel op een zódanige afstand van het oog dat hij de boom AC net bedekt. Let nu op wáár de gezichtslijn langs *b* de stam treft: de hoogte van dit punt B boven de grond is het 10e deel van de hoogte van de boom[3)] (fig. 9).

d. Houd een centimetermaatstaf evenals bij de vorige methode zó dat hij loodrecht neerhangt en de boom net bedekt. Lees nu af waar de gezichteinder de maatstaf snijdt. De lijn van uw oog

1) U. Müller, t.a.p. blz. 128.
2) De Lapasse, Revue des Eaux et Forets blz. 449, 1908.
3) Borgmann, Forstliche Rundschau, blz. 9, 1916.

naar het punt B is nu horizontaal, dus ligt B op ooghoogte boven de grond, stel op 1,65 m. De hoogte van de boom is dan 1,65m × *ac*/*bc*.

e. Ik bevind mij op het dek van een zeeschip, 12 m boven de zeespiegel. Op enige afstand zie ik een rots, de gezichteinder snijdt de rots op een zekere hoogte. Ik kan nu de hoogte van de rots onmiddellijk schatten, bedenkende dat de tussenruimte die ik zie tussen de voet en de gezichteinder met 12 meter overeenkomt (fig. 10). Stel nog dat ik schattenderwijs deze hoogte van 12 m onder een hoek van ongeveer 1° = 0,0175 rad zie, dan vind ik de afstand van de rots: 12/0,0175 = 610 m.
We bedenken te weinig, dat in een vlak land de hoogte van

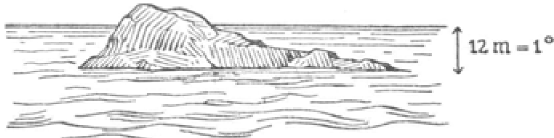


Fig. 10. De hoogten der voorwerpen, bepaald uit de doorsnijding met de gezichteinder.

onze ogen boven de grond een natuurlijke maatstaf is; het is alsof er overal om ons heen meetlatten geplant stonden, die deze hoogte aangeven: alle voorwerpen waarvan we de doorsnijding met de gezichteinder zien, en waarvan de voet op hetzelfde waterpasvlak ligt waarop wij ons bevinden. Hoe hoger we boven de grond staan, hoe groter onze maatstaf en hoe nauwkeuriger onze schattingen. Is de gezichteinder niet vrij, dan is het voldoende in plaats daarvan een ver voorwerp te nemen dat zich naar (zeer ruwe) schatting op ooghoogte boven de grond bevindt, en de nabije voorwerpen ten opzichte daarvan uit te meten.

f. Bepaal de hoogte van een gebouw door de lengte van de schaduw te meten. Aan een goed vertikaal geplaatste stok of aan een schietlood meet u onmiddellijk daarna de verhouding hoogte/schaduwlengte; deze zelfde verhouding geldt voor het gebouw. - Op deze wijze zou Thales aan de Egyptische priesters geleerd hebben, de hoogte der pyramiden te schatten.

De hoogte van de voornaamste Nederlandse torens.

Amersfoort	98 m
Amsterdam, Oude kerk	68 m
Amsterdam, Westerkerk	100 m
Antwerpen	123 m
Arnhem	95 m
Breda	85 m
Brussel, Stadhuis	90 m
Brussel, St. Goedele.	70 m
Brugge, halletoren	108 m
Brugge, O.L. Vrouw	122 m
Delft, N. kerk	108 m
Gent, St. Baafs	80 m
Gent, belfort	82 m
Groningen	95 m
Den Haag, Gr. Kerk	100 m
Haarlem	90 m
Kootwijk, radiomasten	212 m
Leeuwarden, Oldehove	40 m
Mechelen	77 m
Middelburg, LangeJan	87 m
Rhenen	85 m
Utrecht	112 m

6. Diepgang en inhoud van een schip.

De kleinere schepen van de binnenvaart dragen een *ijkingsmerk*, meestal op 4 plaatsen in de wand van het schip gebeiteld, dikwijls niet zeer duidelijk onder de laag teer of verf. Het is een vertikale schaal, het nulpunt staat onderaan en komt overeen met de waterspiegel als het schip onbelast is; de bovenste streep komt overeen met de waterspiegel als het schip zijn volle lading heeft. Op de *ijkbrief* van den schipper vindt men aangegeven hoe groot de waterverplaatsing voor elke streep van de schaal is. Dikwijls is alleen de bovenste streep duidelijk: men meet dan de afstand van de waterspiegel tot aan die streep met een duimstok. Met de ijkbrief kan men ook onmiddellijk aangeven wat de *diepgang* van het schip is: men vindt daarin hoe groot de afstand van het nulpunt der ijking tot de bovenste ijkstreep is, en daarenboven hoe diep de kiel nog onder dat nulpunt ligt.

De grote schepen, vooral die welke op zee varen, op de Rijn, de Merwede, de Noord, hebben aan vóór- en achtersteven een *diepgangsschaal*, waarvan het nulpunt bij de kiel begint, en die uit zeer duidelijke witte en zwarte blokken bestaat. Aan de ene zijde is de schaal verdeeld in decimeters, aan de andere in Engelse voeten (33 cm); dikwijls gebruikt men voor de metermaat Arabische cijfers, voor de voetmaat Romeinse.

Als we ons zonder die schalen moeten behelpen, schatten we dat de diepte van de kiel onder het bovendek gemiddeld 0,6 maal de grootste breedte van het schip bedraagt.

In het midden der lengte draagt het schip aan beide zijden een *uitwateringsmerk* of *Plimsollmerk*, dat de grootste diepte aangeeft tot dewelke het schip geladen mag worden. Het is een

cirkel, doorsneden met een horizontale middellijn; daarnaast is aangegeven hoe deze lijn gewijzigd moet worden:

in de tropen, zoet water	TZW
in de zomer, zoet water	ZW
in de tropen, zeewater	T
in de zomer, zeewater	Z
in de winter, zeewater	W
in de winter, Noord-Atl. oceaan	WNA.

Om de inhoud van een schip te schatten, moeten we zijn grootste lengte *L* en grootste breedte *B* kennen, alsook de diepte *D* van de kiel onder het dek. Als het schip de vorm had van een parallelipipedum, zou de inhoud *LBD* zijn; in werkelijkheid komt er een coëfficient bij, die de 'volheid' van het schip aangeeft, en gemiddeld 0,7 bedraagt. Een scherpe vorm bevordert de snelheid, een stompe vorm de stabiliteit. De bruto-inhoud is dus

$$0{,}7\ LBD\ \mathrm{m}^3 \text{ of } \frac{0{,}7\ LBD}{2{,}83}$$

registertonnen[1] ('groot registertonnage').

Het gewicht van het schip, onbelast en zonder machines, kan geschat worden op 0,2 *LBH* ton (van 1000 kg), waarbij *H* de hoogte is van de kiel tot aan het hoogste doorlopende dek ('verplaatsingstonnage').

Dikwijls hebben we geen gelegenheid de diepte van de kiel te meten, terwijl we daarentegen *L* en *B* gemakkelijk door schatten of afstappen bepalen. Dan gebruiken we de ouderwetse formule: $0{,}5\ B^2(L - 0{,}6\ B)\ \mathrm{m}^3$, die al vanzelf rekening houdt met de gemiddeld voorkomende kielvorm ('Builders Old Measurement').

Bepaal de tonnenmaat van een aantal schepen, zo dat u die langzamerhand op het oog leert schatten, zwervend langs de stoomboten, slepers, zeilschepen, te midden van het laden en het lossen en de bedrijvigheid der zeehaven. Grote zeeschepen hebben een inhoud van 10000-30000 ton; kleinere vracht- of passagierboten 1000-10000 ton; stoomvissersvaartuigen 500 ton; sleepboten 300 ton; kruisers 5000-30000 ton; torpedoboten 500 ton; viermastbarken 3000 ton.

Het zal den lezer wel duidelijk zijn dat de vakman bij dergelijke metingen een heel wat groter nauwkeurigheid eist dan wij bereiken kunnen. Hij heeft dan ook toegang tot het inwendige van het schip, en kan veel meer tijd dan wij aan zijn bepaling besteden. De formules die wij gebruiken zijn eenvoudige voorschriften die vroeger in zwang waren en die een ruwe schatting geven.

1) Een registerton is 100 Engelse kubieke voeten, dus een eenheid van volume.

7. Inhoud van bomen.

Over het schatten en meten van de inhoud van bomen bestaat een ontzaglijke litteratuur, omdat de bosbouw daar zoveel belang bij heeft.[1]. De moeilijkheid

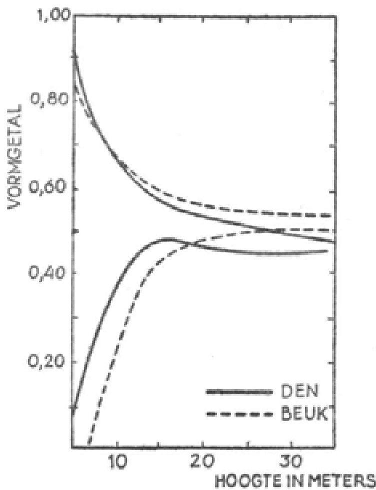


Fig. 11. Vormgetal van bomen.

bestaat daarin, dat de dikte op ingewikkelde wijze langs de stam verandert.

a. De meest gebruikelijke manier is, dat men de hoogte *h* van de boom meet en het oppervlak *s* van de doorsnede op borsthoogte (1,30 m). Het volume is dan *shf*. Het ‘vormgetal’ *f* is proefondervindelijk bepaald en af te lezen uit fig. 11; het geeft de verhouding aan tussen de inhoud van de boom en die van een zuil van zelfde grondvlak (op borsthoogte) en hoogte. De voluit getrokken lijnen hebben betrekking op de den, de gestippelde op de beuk; de beide onderste kurven leren tevens hoeveel hout geleverd wordt door de takken die tenminste 7 cm dik zijn.

b. Men meet het oppervlak *s* van de (denkbeeldige) doorsnede op borsthoogte. Nu gaat men op enige afstand staan, en schat op welke hoogte *k* daarboven de middellijn van de boom tot op de helft afgenomen is: daar ligt het ‘richtpunt’. Om die schatting uit te voeren vraagt men zich af in welk gedeelte van de stam het richtpunt ongeveer ligt, kiest het midden van het gehele gebied waarover men twijfelt, bepaalt de hoogte van dit punt, en telt er nog een meter bij op, omdat de ervaring bewijst dat men meestal te laag geschat heeft. De inhoud van de stam boven de borsthoogte is nu: ⅔*sk*.

c. Zeer eenvoudig is de regel van Denzin. Meet op borsthoogte de middellijn *d* in cm; dan is de inhoud van de stam in m^3:$d^2/1000$. De regel geldt ongeveer voor bomen van 28 m

1) We noemen alleen, bij wijze van voorbeeld, het standaardwerk van U. Müller: Lehrbuch der Holzmesskunde. Berlin 1923.

hoog; voor elke meter min of meer is 4% af te trekken of bij te tellen.

De middellijn *d* op borsthoogte wordt het best bepaald door een touwtje om de stam te slaan en de lengte daarvan te delen door π. De doorsnede is dan $\pi/4d^2$. Voor de bepaling der hoogte: zie § 5.

De houtvester wil ook weten hoeveel hout een geheel bos bevat. Een eenvoudige, zeer ruwe regel is: de hoeveelheid hout (dikker dan 7 cm) per hektare is 16 maal het getal dat de gemiddelde hoogte van het bos aangeeft, - alles gerekend in m^3 en m.
Zie overigens het slot van § 6!

8. De richting Noord - Zuid.

a. Volgens de zon. - Deze oriëntering is praktisch, maar ruw als men niet precies overweegt wat men doet. Op de middag staat de zon in 't Zuiden - mits men 'zonnetijd' gebruikt; neemt men de tijd van onze gewone uurwerken, dan kan de richting tot 5° fout zijn. Veel onnauwkeuriger is de regel, dat de zon om 6 u. 's ochtends in het Oosten en om 6 u. 's avonds in het Westen staat; dat kan op onze breedten 15° fout extra veroorzaken (afgezien dus van de tijdfout). - Een juister oriëntering verkrijgt men als volgt. Houd uw horloge in de linkerhand, duim bij IX, wijsvinger bij III; kantel het horloge om die twee vingers, tot XII ongeveer 50° naar omhoog gericht is. Houd een lucifer (speld, dennenaald) halverwege tussen het cijfer XII en de plaats waar de kleine wijzer nu staat, loodrecht op het wijzerblad. In de zon werpt die lucifer een schaduw; en men draait het horloge tot die schaduw precies door het middelpunt gaat, wat zich keurig precies laaat uitvoeren. Het cijfer XII wijst dan de Zuidrichting aan[1)].

Waarom geldt deze regel? Waarom moeten we 't horloge schuin houden?

In het winterhalfjaar is de regel niet uitvoerbaar, omdat de schaduw dan aan de *onder*kant van het horloge valt; in die periode kan men echter de wijzerplaat veilig horizontaal houden: de fout die daardoor ontstaat is nooit groter dan 8°.

b. Volgens de Maan. - Dit gaat het best wanneer de Maan net een der karakteristieke schijngestalten vertoont. Bij eerste kwartier is ze 6 uur achter bij de zon; we denken ons horloge dus

1) Een ander eenvoudig recept in: die Himmelswelt, **27**, 50, 1917.

6 uur teruggezet, de Maan door de zon vervangen, en we voeren de bepaling uit zoals bij *a* beschreven. Bij volle Maan moeten we 12 uur aftrekken, bij laatste kwartier 18 uur aftrekken, of 6 uur optellen. Voor daartussen liggende schijngestalten moet geïnterpoleerd worden, maar de tijdsbepaling wordt dan merkbaar onzekerder.

c. Volgens de sterren (fig. 12). - De Poolster wijst min of meer nauwkeurig het juiste Noorden aan. Om haar te vinden zoekt men eerst *de Grote Beer*, 7 heldere sterren aan de Noordzijde van de hemel, die volgens het uur van de nacht en het jaargetijde in allerlei standen ten opzichte van de gezichteinder gericht kunnen zijn. Verleng nu de lijn *αβ* ongeveer 5 maal: daar staat *de Poolster*. Het is een tamelijk heldere ster, zelf weer behorend tot het sterrebeeld *de Kleine Beer*, dat uit vrij zwakke sterren bestaat. De eigenlijke pool ligt ruim 2 maansmiddellijnen daar vandaan, in de richting naar de ster Mizar van de Grote Beer (fig. 12). - In § 13 zullen we zien hoe men ook de richtingen Oost en West uit de sterren vinden kan.

d. Naar de plantengroei. - De groene aanslag, die men op de meeste boomstammen vindt, bestaat uit mikroskopische groenwieren (Pleurococcus vulgaris). Hij komt meestal aan de vochtigste zijde van de stam voor, dat is bij ons de ZW-zijde.
In de stam van alleenstaande beukebomen vindt men dikwijls vertikale barsten van 1 tot 2 m lengte, aan de kant waar de stam het sterkst door de zon verwarmd en uitgedroogd wordt (meestal ZZW); in de winter worden deze barsten nog door de vorst verwijd.
Niet ver van onze Noordzeekust zijn de bomen meestal door de heersende wind Oostwaarts gekromd.

e. Naar de stafkaart. - Zoek daarop de plaats waar u bent, en bepaal met de kaart de juiste oriëntering van goed kenbare punten: kerktorens, heuvels enz. Hoe verder verwijderd de voorwerpen, des te nauwkeuriger het resultaat. Zeer precies wordt deze bepaling met het kompas van Bézard (§ 9).

9. Het kompas.

De magneetnaald wijst thans in Nederland ongeveer 8° westelijk van het ware Noorden. Draai het kompas tot de naald die stand op de windroos ingenomen heeft, zorgend dat het instrumentje goed horizontaal ligt, en zachtjes er tegen tikkend, om zeker te zijn dat de naald geheel vrij bewegelijk is. De windstreken zijn dan tevens juist gericht.

Bij het kopen van een kompas beproeve men vooral de scherpte van het spilletje dat de naald draagt. Hiervoor zijn er verschillende, zeer bruikbare recepten. - *a*) Men legt het kompas op de tafel, en geeft het met een ijzeren voorwerp, dat men heel langzaam dichterbij brengt, een uitwijking van 1°; de kracht die de naald naar de evenwichtsstand terugdrijft is nu nog zeer zwak, maar moet in staat zijn haar te doen teruggaan, zodra het ijzeren voorwerp langzaam verwijderd wordt. Bij slechte kompasjes begint de naald dikwijls pas terug te gaan bij een uitwijking van 5°. -

b) Geef aan de naald een afwijking van 5° naar links, door een ijzeren voorwerp voorzichtig naderbij te brengen; verwijder het voorwerp langzaam, en lees de eindstand van de naald af. Geef nu evenzo aan de naald een afwijking van 5° naar rechts, en lees weer de eindstand af. Het verschil der aflezingen mag niet groter zijn dan 2°. -

c) Span een draadje boven de naald, precies in de richting van haar as, en draai nu voorzichtig het huisje: de naald moet haar richting behouden. Bij slechte kompasjes werd bevonden dat ze zelfs tot 6° achterbleef!

Vervolgens dient men na te gaan of het magnetisme van de naald voldoende krachtig is. Geef aan de naald een afwijking van 45°, en laat haar dan vrij slingeren: de tijd tussen twee even of twee oneven doorgangen door het nulpunt (de *gehele* slingertijd) moet kleiner zijn dan 15 sec. Hierbij is aangenomen dat het aardveld ter plaatse een sterkte heeft van de orde $\mathcal{H}$ = 0,20 (Keuringseis van het Bureau of Standards).

Het *kompas van Bézard* is bijzonder praktisch voor de oriëntering op het terrein[1]. - Beginsel: de windroos is hier instelbaar ten opzichte van het huisje, waaraan een viseerinrichting bevestigd is; deze windroos dient om een bepaalde hoek vast te leggen tussen de viseerrichting en de meridiaan. De meridiaan is de ene maal bepaald door de magneetnaald, de andere maal door de NZ-lijn van de kaart. Op deze wijze kunnen hoeken van het landschap naar de kaart en omgekeerd overgebracht worden.

1. Een richting in het landschap vasthouden. - Mik met de viseerinrichting op een punt in de verte; draai ondertussen de windroos, en zorg dat de naald inspeelt. Nadat u een eind gelopen heeft, kunt u opnieuw viseren; als u zich daarbij zó draait dat de naald weer inspeelt, weet u zeker dat u de oorspronkelijke richting

1) Prijs groot model: f 14. -.

vastgehouden heeft. (Een index geeft u daarenboven nog de hoek tussen deze richting en het Noorden).

2. Een richting van het landschap naar de kaart overbrengen. - Mik met de viseerinrichting op het bedoelde punt in de verte, en draai de roos tot de naald inspeelt. Zet het kompas nu op de kaart, en draai het zo, dat de woorden 'Patent Bézard' evenwijdig aan de EW-richting der kaart gericht zijn. U kunt dan direkt aflezen hoe de viseerrichting op de kaart loopt. (Een index geeft u daarenboven de hoek tussen deze richting en het Noorden).
3. Een richting van de kaart overbrengen naar het landschap. Zet het kompas op de kaart met de viseerinrichting op de gewenste lijn. Draai de roos, tot de letters 'Patent Bézard' evenwijdig zijn aan de EW-richting der kaart. Viseer nu in 't landschap: draai u, tot de naald inspeelt op de roos, en kijk in welke richting het vizier nu wijst. (De index geeft u daarenboven de hoek tussen die richting en het Noorden).

10. Korte tijdsruimten . Horloge.

De meeste horloges hebben een sekundewijzer, zij wijzen en tikken vijfde delen van een sekunde. Het meetellen op 't gehoor vergt enige oefening; men telt **0** 1234 **1** 1234 **2** 1234 .... Weldra went men aan de eigenaardige vijftallige rhythmus.

De goedkope wekkers, die zo algemeen verspreid zijn, tikken 200 maal per minuut. Dit is erg praktisch voor het bepalen van de afstand van een onweer uit het tijdsinterval donderbliksem: want het geluid legt 340 m per sekunde af, dus vrijwel 100 *meter per tik* van de wekker.

Een touwtje waaraan een keitje of een ander gewichtje hangt, slingert van de ene uiterste stand naar de andere in één sekunde, indien de afstand van zijn ophangpunt tot het midden van het gewichtje 99,5 cm bedraagt. Een slinger van 25 cm gaat in 1 sekunde heen en terug.

Polsslagen kunnen ook dienen voor de tijdmeting: Galilei maakte ervan gebruik toen hij de hanglamp waarnam in de domkerk te Pisa, en de gelijke duur van de grote en de kleine slingeringen opmerkte! Het normale aantal is 75 per minuut, maar snelle beweging, angst, ... kunnen dit enorm doen stijgen.

Ieder natuuronderzoeker moet sekunden kunnen tellen zonder uurwerk. Daartoe oefent men eerst door tot 60 te tellen en dan op 't horloge te kijken of er inderdaad een minuut verlopen is;

zo nodig telt men een volgende maal iets langzamer of sneller. Bij het tellen gedurende enige minuten hoeft de fout niet groter te zijn dan ongeveer 10%; sommige waarnemers zijn zo geoefend in de kunst, dat ze gedurende het tellen een praatje over het weer maken, zonder in de war te komen!

Bepaal voor enkele grote vogels hoeveel vleugelslagen ze per sekunde uitvoeren (kraai, reiger, enz.)
Bepaal hoe lang een vertikaal omhooggeworpen steen er over doet eer hij op de grond terugvalt (§ 149).

Onderzoek de eigenaardigheden van uw horloge, dat we bij allerlei gelegenheden nodig zullen hebben.

Vooreerst lezen we af, bij welke streep de sekundenwijzer staat als de grote wijzer juist een minuutstreep bereikt heeft (loupe!). In de loop van een uur blijkt deze aflezing meestal aanzienlijk te verlopen; oorzaak: de as van de grote wijzer zit niet precies in 't midden (‘excentriciteit’).

De gang van het horloge kan gecontroleerd worden volgens § 11 en § 12. Deze gang is meestal zeer verschillend naarmate het horloge ligt of hangt. Normaal is, dat het horloge in de vestzak wordt gedragen; polshorloges lopen in 't algemeen minder nauwkeurig. Vergelijk uw goedlopend horloge vóór en na een treinreis met dezelfde stationsklok: de schokken van de trein hebben blijkbaar invloed gehad op de gang, het horloge is achter gaan lopen. De temperatuur heeft insgelijks invloed, want de corrigerende inrichting die daarvoor in het horloge zit werkt niet volmaakt. De gang bij nacht is anders dan bij dag, zowel wegens het verschil in de schokken als wegens de andere temperatuur. Door uw horloge elke dag op hetzelfde uur op te winden bereikt u dat de gang veel regelmatiger wordt.

11. Middelbare tijd.[1)]

De Nederlandse stationsklokken worden elke dag om 10 uur gelijkgezet, volgens een tijdsein dat van Amsterdam uit telegraphisch aan alle stations wordt medegedeeld. De wijzer van de elektrische klok verspringt éénmaal per minuut, op het ogenblik waarop hij net versprongen is wijst hij Greenwichtijd + 20^m0^s.[2)] De fout is ten hoogste 0,5 minuut, de dagelijkse

1) De theorie der tijdmeting vindt men op heldere wijze uiteengezet in: J. van der Bilt, De Astronomische Hemelverschijnselen - (Zutphen, Thieme 1934).

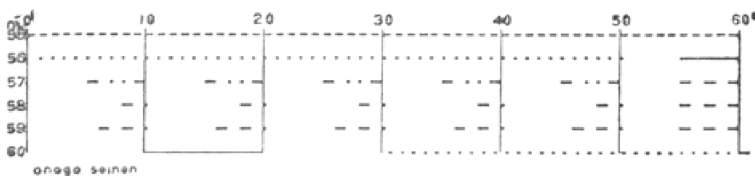
2) Dus geen Amsterdamse tijd, aangezien deze gelijk is aan Greenwichtijd + 19^m32^s. We zouden gevoegelijk kunnen spreken van ‘Nederlandse tijd.’

gang niet meer dan 10 sekunden; tussen de aanwijzing en de juiste tijd is het verschil dus nooit meer dan 1 minuut.

Radioseinen[1]. 1. Sedert 11 Mei 1942 geeft de N.R.O. tijdseinen te 5^h45^m, 6^h15^m, 11^h00^m, 17^h00, 18^h00 West-Europese tijd. Op de 50^e, 52^e, 54^e, 56^e sekunde hoort men een dubbele punt; daarop volgen 5 punten, om de halve sekunde, van sekunde 58 tot sekunde 60; het laatste punt is de volle, aangegeven minuut. Een nauwkeurigheid van enkele 0,1 sec wordt beoogd.

2. De volgende seinen worden uitgezonden door de Deutschlandsender (1571 m) te 5^h00, 10^h00, 16^h00, 21^h00, en door de Hamburgzender (332 m) te 5^h00, 9 00, 13^h00, 17^h00, 21^h00 W.E. tijd. Men hoort scherpe tikken op alle sekunden van 30 tot 40, dan op de sekunden, 45, 50, 55, 58, 59, 60. De nauwkeurigheid is 0,15 sec.

3. De ‘Onogo-seinen’ worden o.a. uitgezonden door de Deutschland-zender (1571 m) van $11^h55^m00^s$ tot $12^h01^m01^s$. Schema:



Vergelijk gedurende enige opeenvolgende dagen uw horloge met een radiotijdsein en bepaal de gang. Is die anders 's winters dan 's zomers? Over dag en des nachts? Liggend of hangend? Bij opwinden op een vast uur elke dag of op onregelmatige tijden?
Onderzoek hoe laat precies een torenklok slaat: u vindt aanzienlijke afwijkingen tussen de opeenvolgende dagen.

12. Tijdcontrôle volgens de sterren[2].

De tijd die draadloos wordt geseind is afgeleid uit de waarneming der sterren. Waarom zouden wij, die de natuur bestu-

1) G. van Herk, Hemel en Dampkring, **40**, 177, 1942. - Het cliché der Onogo-seinen is met vriendelijke toestemming der redactie uit deze verhandeling overgenomen.
2) Dit is de methode van Olbers, arts en beroemd liefhebber-sterrekundige, de ontdekker van de planetoide Pallas en kometenwaarnemer; Monatliche Korrespondenz, 1801. - Vgl. ook K. Schwarzschild in Klein-Riecke, Neue Beiträge z. Frage d. math. phys. Unterrichts, blz. 157, 1904. - Domke, W. Foerster, Ph. Fauth in Mitt. Ver. Fr. Astr. 8, 15, 1898; **9**, 83, 1899.

deren, ons horloge niet *rechtstreeks* met de sterren vergelijken? We beschikken over geen kijker, maar toch kan de waarneming verrassend nauwkeurig gemaakt worden.

Van de plaats waar we kijken moeten we een hoog gebouw kunnen zien, bijvoorbeeld een toren of fabrieksschoorsteen op 150 m afstand, en wel in zuidelijke richting; de afwijking van de meridiaan mag echter best een 20-tal graden of zelfs meer bedragen. We bevestigen aan het vensterkruis van onze waarnemingskamer een stukje karton of een plankje met een opening van 1 cm middellijn, om zeker te zijn dat we ons oog altijd op hetzelfde punt zullen houden; of we plakken op de ruit twee etiketjes, met daartussen een vertikale spleet van 1 cm breedte. Nu zien we 's nachts hoe de ene ster na de andere door de schijnbare dagelijkse draaiing van het hemelgewelf achter de toren verdwijnt. Het is zeer merkwaardig hoe snel dat gaat: in weinige sekunden tijds ziet men de lichtsterkte afnemen en ineens is de ster weg; dat laatste ogenblik is scherp bepaald.

Op achtereenvolgende dagen verdwijnt de ster altijd nauwkeurig op dezelfde *sterretijd*, dat wil zeggen dat ze volgens de gewone middelbare tijd onzer uurwerken *elke dag* $3^m\ 56^s$ *vroeger* verdwijnt: de sterreklok loopt vóór, maar alle dagen evenveel. Men neemt dus éénzelfde ster gedurende achtereenvolgende dagen waar; als men niet telkens een verschil van 3^m56^s, dus bijna 4 minuten vindt in de verdwijningstijdstippen bewijst dit dat ons horloge niet nauwkeurig loopt, en een *gang* vertoont, waarvan we het bedrag kunnen aangeven.

De beste manier om de waarneming uit te voeren is: telkens verscheiden sterren waarnemen, voor ieder daarvan het verschil met de vorige dag berekenen en het gemiddelde nemen. Men behoeft dan geen fout te maken van meer dan ½ sekunde!

De reden waarom de sterretijd zo buitengewoon regelmatig verloopt, is eenvoudig deze: de schijnbare draaiing van de sterrenhemel is het gevolg van de aswenteling der Aarde, zonder enig ander storend verschijnsel; en die aswenteling zelf is volmaakt gelijkmatig. Daarom is de sterretijd de grondslag van onze tijdmeting.

In plaats van een toren in zuidelijke richting, kunnen we ook gebruik maken van een horizontale dakenlijn aan de westelijke horizon: we zien dan de ster achter die dakenlijn ondergaan. Hierbij kan echter de aardse straalkromming, die van dag tot dag veranderlijk is, merkbare fouten veroorzaken.

13. Sterretijd.

In §§ 11 en 12 hebben we *de gang* van ons horloge nauwkeurig

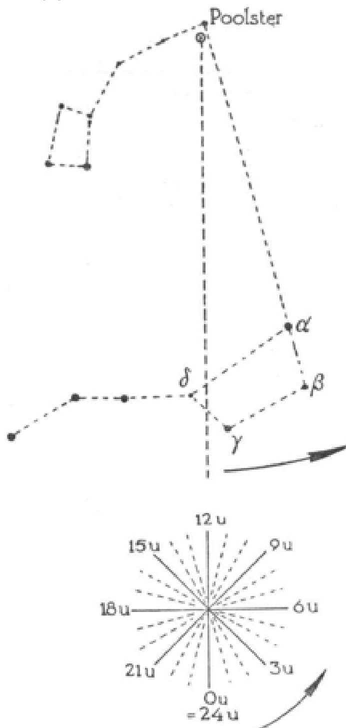


Fig. 12. Oriëntering en tijdbepaling volgens de sterren. De wijzer onzer ‘hemelklok’ is thans vertikaal naar beneden gericht: het is 0^b sterretijd. Daaronder zijn de standen van de wijzer voorandereuren aangegeven.

leren bepalen. Het komt er nu op aan, *de stand* zelf te vinden. Met onze eenvoudige hulpmiddelen is die uit sterwaarnemingen slechts ruw af te leiden; een nauwkeuriger methode maakt gebruik van de zon (§ 15).

Enkele eenvoudige middelen laten ons toe, op nachtelijke wandelingen de tijd uit de sterren te schatten; alle drie geven ze ons *plaatselijke sterretijd*, die we daarna moeten omrekenen in *plaatselijke middelbare tijd*.

a. Op de verbindingslijn der sterren *α* en *β* van de Grote Beer vindt u de Poolster (fig. 12). Die wordt het middelpunt van ons hemeluurwerk. De wijzer zal zijn: een lijn van de Poolster naar de ‘achterpoten’ van de Grote Beer, nauwkeurig tussen de sterren *γ* en *δ*. Als deze wijzer loodrecht naar beneden staat, is het 0 uur sterretijd. Hij draait nu rond zoals de wijzer van een uurwerk, maar *in tegengestelde zin* en *in* 24 *uur* in plaats van in 12. Met enige oefening kunnen we hieruit de sterretijd best op een uur of een half uur nauwkeurig bepalen[1)], vooral indien we de stand van de sterrewijzer vergelijken met een schietlood, uit een touwtje en een steen geimproviseerd.[2)]

b. Bepaal het Zuiden.[3)] Keer u hiertoe eerst naar de Poolster;

1) Hemel en dampkring **12**, 97, 1914.
2) Knutselaars kunnen gemakkelijk de ‘Nachtklok Groote Beer’ in elkaar zetten, ontworpen door W.G. ten Houte de Lange (uitg. Kramers, Rijswijk Z.-H.).
3) H.H. Kritzinger, Deutsche Zs. f. Luftschifffahrt **15**, 1911, Heft 4, 3.

strek de armen rechts en links uit, iets meer naar voren dan precies dwars, zodat de verbindingslijn der vingers door de ogen gaat. Let nu op naar welke sterren de handen wijzen, en draai u 180° om: de handen moeten nu weer naar dezelfde punten gericht zijn, zoniet dan hadt u de armen iets wijder of iets minder wijd moeten openen. U kijkt nu recht naar het Zuiden en ziet vóór u een stuk van de ‘Dierenriem’, die u op elke steratlas afgebeeld vindt; zoek daarop welke ster precies vóór u in 't Zuiden staat, en lees de ‘rechte klimming’ af die erboven geschreven is: dit is teven de sterretijd op dit ogenblik.

c. Als een ster in het Oosten of in het Westen staat, stijgt of daalt zij het snelst; daarvan uitgaande kan een nauwkeurige tijdsbepaling uitgevoerd worden, die in de praktische sterrekunde veel gebruikt wordt. Het volgende tabelletje, voldoende nauwkeurig geldend voor heel Nederland, geeft eens en vooral voor enkele bekende sterren hoe hoog ze staan als ze precies in het O. of in het W. zijn. Wij meten hun hoogte met een onzer eenvoudige hulpmiddelen (§ 2) en wachten tot het vereiste bedrag bereikt is: voor dit ogenblik geeft ons tabelletje dan tevens de sterretijd. Heeft de ster niet geheel de vereiste hoogte, dan onthouden we, dat nabij O. of W. 1° *hoogteverandering met* 6,5 *minuut tijdsverandering* overeenkomt.

Sterretijd

	hoogte	***Oost***	***West***
Betelgeuze	10°	$0^{h}18^{m}$	$11^{h}22^{m}$
Procyon	7°	1 55	13 15
Pollux	38°	3 25	11 55
Regulus	16°	4 48	15 20
Denebola	21°	6 41	16 48
Arcturus	26°	9 20	19 4
Altair	11°	14 14	1 18
Aldebaran	21°	23 27	9 35

Sterretijd te middernacht

1 Jan.	$6^{h}41^{m}$	1 Juli	$18^{h}33^{m}$
1 Febr.	8 43	1 Aug.	20 36
1 Maart	10 33	1 Sept.	22 38
1 April	12 35	1 Oct.	0 36
1 Mei	14 33	1 Nov.	2 41
1 Juni	16 35	1 Dec.	4 39

Nu moeten we nog *van plaatselijke sterretijd naar plaatselijke middelbare tijd kunnen overgaan*. Beide vallen samen op 23 Sep-

tember; de volgende dag is het 24 uur sterretijd, terwijl het slechts 23^h56^m middelbare tijd is; nog een dag later komt 24 uur sterretijd overeen met 23^h52^m; enz.

In het tabelletje hierboven vindt men de sterretijd te middernacht op de 1e van elke maand; daarbij telle men nog zoveel maal 4 minuten op,[1] als er dagen in die maand verlopen zijn; voor elke halve maand dus één uur.

14. Tijdcontrôle volgens de zon.[2]

De regelmaat van ons horloge kunnen we evengoed met de zon controleren als met de sterren. De beweging van de zon aan de hemel is in zoverre ingewikkelder, dat ze niet elke dag dezelfde baan aflegt, maar in de loop van het jaar geleidelijk verschuift. De eenvoudigste waarnemingswijze is, haar stand *omstreeks middagtijd* te bepalen.

Achter het open raam hangen we in onze werkkamer twee schietloden achter elkaar, zo nauwkeurig mogelijk in het Noord - Zuid-vlak. Het schietlood dat het dichtst bij het raam hangt is een touwtje van dikte *d*; het tweede, dieper in de kamer, is een draad wit naaigaren; de afstand der twee schietloden moet ongeveer 100 *d* zijn (zodat de lichtbundels van de zon die aan beide kanten van het touw voorbijgaan met een openingshoek 1/100, elkaar bij het draadje ontmoeten; vgl. I, § 1). Op een blad papier kan men nu de schaduw van de twee schietloden opvangen, en ziet dan heel duidelijk op welk ogenblik de ragscherpe schaduw van de draad zover is voortgeschoven dat hij precies te midden van de wazige schaduw van het touwtje valt: dit kan op 1 tijdsekunde nauwkeurig bepaald worden!

We regelen de stand der twee schietloden tot de twee schaduwen vrijwel precies te 12 uur zonnetijd over elkaar gaan. Meestal is die regeling nog niet volkomen; als echter de schaduwen heden samenvallen te $12^h\ 0^m\ 14^s$ bijvoorbeeld, zullen zij ook morgen en de volgende dagen te $12^h\ 0^m\ 14^s$ zonnetijd blijven samenvallen.

Op deze wijze kunnen we dus de loop van de zon vergelijken met ons horloge dat reeds volgens de sterren gecontroleerd was. Tot onze verrassing vinden we nu, dat de zonnedag niet altijd even lang duurt; het treffendste verschil vinden we tussen Januari en April: op 1 Januari is de zonnedag 29 sec te lang, op 1 April 18 sec te kort. We bedoelen hiermee: te lang (of te kort) ten

1) Juister: 3^m56^s.
2) E. Hammer: Zeitbestimmung ohne Instrumente (Stuttgart 1893). - K. Schwarzschild in Klein-Riecke, t.a.p.

opzichte van de *middelbare dag*, het gemiddelde van de zonnedagen over het gehele jaar, de dag die al onze klokken aanwijzen moeten als ze goed lopen. - Houd dus rekening met dit kleine verschil, aangegeven in volgend tabelletje (voor 1940), en controleer nu ook op de zon het lopen van uw horloge.

Ware Zonnedag - Middelbare Dag.

1 Jan. 1 Febr. 1 Mrt 1 April 1 Mei 1 Juni 1 Juli 1 Aug. 1 Sept. 1 Okt. 1 Nov. 1 Dec. $+29^s$ $+9^s$ -12^s -18^s -7^s $+9^s$ $+12^s$ -3^s -19^s -19^s -2^s $+22^s$

15. Middag, bepaald volgens de methode der gelijke zonshoogten.

We volgen nu voor de zon dezelfde gedachtengang die we reeds voor de sterren hebben uiteengezet: nadat we het verloop van ons horloge hebben bepaald, willen we ook het juiste ogenblik van de middag met onze eenvoudige middelen bepalen.

Tot beter begrip beginnen we met het opstellen van een *gnomon*: een schietlood dat schaduw werpt; of een gevouwen

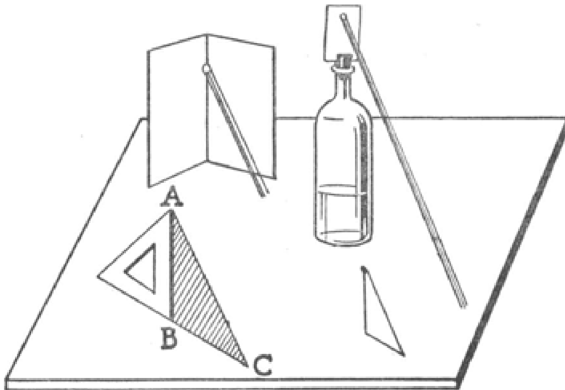


Fig. 13. Eenvoudige vormen van gnomon.

blad karton met een gaatje; of een flesje dat als statief dient en een doorboord stukje hard papier draagt; of een paal van bekende hoogte; of een simpele grote speld; of een tekendriehoek, loodrecht geplaatst en met zijn vlak door de zon (fig. 13).

Met behulp van dit eenvoudige, oeroude instrument wordt de zonshoogte bepaald, uit de verhouding:

$$\text{tg zonshoogte} = \frac{\text{gnomonhoogte AB}}{\text{schaduwlengte BC}}$$

Stel de gnomon buiten op een tafeltje waar hij een groot stuk

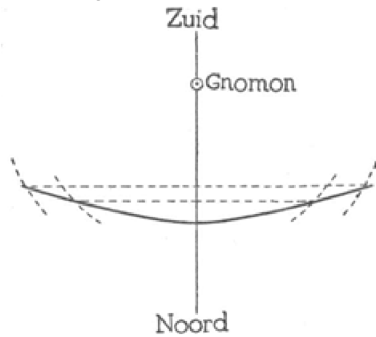


Fig. 14. Bepaling van de Noord-Zuidlijn en van de zonnemiddag met behulp van de gnomon.

van de dag zonlicht krijgt en waar u zeker bent dat niemand er aan raken zal. Teken nu zo nauwkeurig mogelijk hoe de schaduw van de gnomon zich in de loop van de dag verplaatst, telkens ook de tijden optekenend (fig. 14). Het uiteinde van de schaduw (of het lichtspoor van de kleine opening) beschrijft een hyperbool op het papier; door twee aan twee de punten te verbinden die even ver verwijderd zijn van de gnomon, en de verbindingslijnen te halveren, vinden we *de richting Zuid - Noord*; het ogenblik waarop de schaduw door die lijn

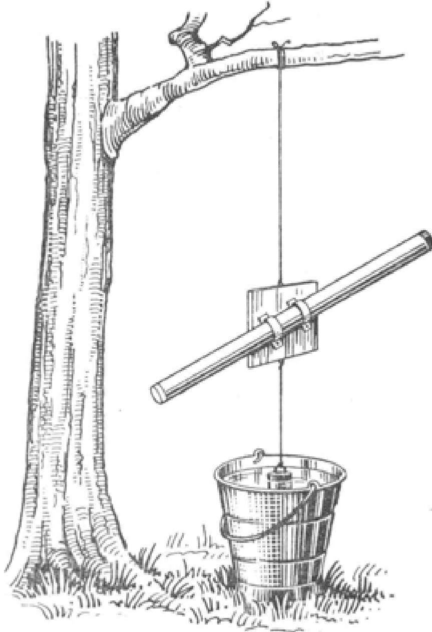


Fig. 15. Bepaling van de zonnemiddag uit korresponderende zonshoogten.

ging was *de ware zonnemiddag*.

> Onderzoek hoe de lengte der middagschaduw in de loop van het jaar verandert. Breedtebepaling. Helling der ekliptika.

Veel nauwkeuriger wordt de bepaling, als men een lange kartonnen koker neemt en die vastmaakt aan een plankje, dat zelf met een touw aan de dikke tak van een boom hangt (fig. 15). Het touw wordt naar beneden verlengd, en we bevestigen er een gewicht aan, of een steen, in een pan water dompelend en de slingeringen dempend. Aan het ene uiteinde van de buis plakken we een stuk zwart papier met een centrale opening van enige millimeters; aan het andere uiteinde een stuk doorschij-

nend papier met een horizontale streep. Als het zonlicht onder de juiste helling door het openingetje invalt, vormt het een ronde lichtvlek op het doorschijnende papier. Richt 's ochtends de koker naar de zon, en teken nauwkeurig op hoe laat de ronde lichtvlek net middendoor gedeeld wordt door de streep. Nu moet 's namiddags die bepaling herhaald worden, *zonder dat er iets aan de helling van de buis verandert*; het toestel mag alleen heen en weer draaien om het touw als as. Al een kwartier vóór het verwachte tijdstip moet u op wacht staan, om het goede ogenblik niet te laten ontsnappen! 't Gemiddelde der twee aldus bepaalde tijden, waarop de zon even hoog stond en de schaduwen even lang waren, is de ware zonnemiddag = 12 uur *ware zonnetijd*.[1)]

Onze proeven zijn het belangwekkendst omstreeks midden Februari en in de eerste dagen van November: dan juist kan men zo duidelijk zien hoezeer de ware zonnetijd verschilt van de middelbare tijd.

Plaatselijke zonnetijd + *tijdvereffening* = *plaatselijke middelbare tijd*.

Door deze correctie worden alle dagen even lang gemaakt, 'vereffend'.

Middelbare tijd - Zonnetijd, voor de 1e en de 15e van elke maand.

I $+ 2^m58^s$	III $+ 12^m32^s$	V $- 2^m54^s$	VII $+ 3^m35^s$	IX $+ 0^m06^s$	XI $- 16^m18_s$
$+ 9^m01^s$	$+ 9^m10^s$	$- 3^m45^s$	$+ 5^m46^s$	$- 4^m38^s$	$- 15^m25_s$
II $+ 13^m29^s$	IV $+ 4^m04^s$	VI $- 2^m24^s$	VIII $+ 6^m13^s$	X $- 10^m10^s$	XII $- 11^m04_s$
$+ 14^m19^s$	$+ 0^m11^s$	$+ 0^m12^s$	$+ 4^m29^s$	$- 14^m04^s$	$- 5^m01_s$

Plaatselijke middelbare tijd - *correctie voor lengte* = *Nederlandse middelbare tijd*.

Deze correctie brengt in rekening: het lengte-verschil tussen het waarnemingspunt en de in Noord-Nederland algemeen gebruikte meridiaan van 5° Oosterlengte; zij is voor een aantal onzer steden hieronder opgegeven. Ter herleiding op de meridiaan van Greenwich is de correctie 20^m groter: men moet 20^m extra aftrekken van de plaatselijke middelbare tijd.

Amsterdam	$- 0^m28^s$	Leeuwarden	$+ 3^m11^s$
Antwerpen	$- 2^m20^s$	Leiden	$- 2^m01^s$
Arnhem	$+ 3^m41^s$	Leuven	$- 1^m11^s$
den Bosch	$+ 1^m14^s$	Maastricht	$+ 2^m04^s$
Brugge	$- 7^m05^s$	Mechelen	$- 2^m04^s$
Brussel	$- 2^m34^s$	Middelburg	$- 5^m34^s$

1) K. Schwarzschild in Klein-Riecke, Neue Beiträge, blz. 164, 1904.

Gent	$- 5^m06^s$	Nijmegen	$+ 3^m29^s$
Groningen	$+ 6^m15^s$	Rotterdam	$- 2^m04^s$
den Haag	$- 2^m44^s$	Utrecht	$+ 0^m31^s$
Haarlem	$- 0^m45^s$	Zwolle	$+ 4^m23^s$

Voorbeeld. Met de draaiende koker vinden we dat de ware zonnemiddag overeenkomt met $11^h58^m50^s$ op ons horloge. We hebben waargenomen op 14 Mei en we wonen te Utrecht.

We berekenen:

12^h plaatselijke zonnetijd komt overeen met $12^h0^m0^s$ - - $0^h3^m55^s = 11^h56^m5^s$ plaatselijke middelbare tijd; of ook met $11^h56^m5^s - 0^h0^m31^s = 11^h55^m34^s$ Nederlandse middelbare tijd. Ons horloge loopt dus $11^h58^m50^s - 11^h55^m34^s = 3^m16^s$ vóór.

16. Bepaling van de aardrijkskundige lengte en breedte.

De hoogte van de N-pool boven de gezichteinder is gelijk aan de *breedte* van onze waarnemingsplaats. Het is dus voldoende de hoogte der Poolster te meten (§ 8*c*), eventueel nog rekening houdend met de kleine afstand van de Poolster tot de ware pool.

De lengte vinden we uit de tijd. We hebben geleerd, uit de sterren of uit de zon plaatselijke middelbare tijd af te leiden. Nu beweegt de zon van Oost over Zuid naar West; het is eerst middag voor landen oostelijk van Greenwich, daarna voor plaatsen op de 0-meridiaan van Greenwich, nog later voor landen ten Westen.

Het verschil tussen onze plaatselijke middelbare tijd en de middelbare tijd van Greenwich geeft dus onze lengte t.o.v. Greenwich:

1 uur tijdsverschil komt overeen met 15°.

Om op reis af en toe de lengte te kunnen schatten, moet u uw horloge Greenwich-tijd laten aanwijzen, en het gedurende de hele reis niet verzetten. Overal waar u dan plaatselijke tijd bepaalt kunt u het tijdsverschil met Greenwich en dus de lengte vinden.

Nu nog *een nauwkeurige methode voor plaatsbepaling*, de nauwkeurigste die men zonder instrumenten toepassen kan.[1)] Een ontdekkingsreiziger die zijn instrumenten verloren heeft, kan met behulp daarvan nog altijd plaatsbepalingen uitvoeren die voor de meeste doeleinden voldoende zullen zijn.

Vier stevige manshoge palen worden aan de hoekpunten van

1) P. Harzer, Peterm. Mitt. **42**, 111 en 252, 1896. - Mitt. Ver. Fr. Astr. **6**, 49, 1896.

een vierkant in de grond geslagen en aan de bovenzijde door vier dwarslatten verbonden. Van een dunne, sterke draad worden de twee uiteinden aan het midden A der ene lat en aan het midden C der lat daartegenover bevestigd; de draad moet tot bij de grond doorhangen, onderaan wordt er een steen met een touwtje aan gebonden. Evenzo wordt een tweede draad bevestigd aan B en D in een vlak, ongeveer loodrecht op dat van de eerste draad. De slingeringen der stenen dempt men met een pan water.

De waarnemingen geschieden 's avonds; men verlicht de draden met een zaklantaarn, die op een tafeltje naast den waarnemer staat. Mik met één oog langs het vertikale vlak van de twee segmenten van de draad AC (of van BD), en bepaal hoe laat een bekende ster door dit vlak gaat. Voor elk dradenstel neemt men 2 sterren waar, in totaal dus 4 doorgangstijden. Uit deze 4 waarnemingen kan men berekenen: 1. de aardrijkskundige breedte; 2. de plaatselijke tijd; 3. en 4. de azimuthrichtingen der twee dradenparen. Harzer vond een fout van een paar boogminuten in de breedte en van ongeveer 8 sekunden in de tijd!

De aardrijkskundige lengte wordt bepaald door te zorgen dat één der dradenparen ongeveer in de meridiaan ligt, de tijd te bepalen waarop de maan precies gehalveerd wordt door het vlak van die draden, en dan nog de doorgangstijd van een of meer sterren nauwkeurig vast te leggen.

Voor de berekening verwijs ik den lezer naar de aangehaalde oorspronkelijke verhandelingen.

17. De kromming der aarde.[1)]

Aanschouwelijke bewijzen voor de rondheid der Aarde zijn iedereen bekend:

de ronde lijn van de gezichteinder, die we overal kunnen waarnemen;

de verre schepen, waarvan eerst de masten en pas daarna de romp in 't gezicht komt (toneel- of veldkijker gebruiken!);

de ronde schaduw der Aarde bij maansverduisteringen.

De volgende waarneming is echter een welkome aanvulling, daar ze ons *een schatting geeft van de straal der Aarde*. - Twee waarnemers bevinden zich aan de oever van de zee en zien de zon ondergaan. De ene klimt boven op een duintop, de andere blijft beneden aan 't strand; ze spreken af dat ze een schreeuw zullen geven (of de arm opheffen) op het ogenblik dat ze de laatste rand van de zon zien verdwijnen. Het blijkt nu dat de

1) Methode bedacht door Professor J.C. Kapteyn.

twee schreeuwen volstrekt niet gelijktijdig weerklinken: de waarnemer op de duintop ziet de zon *veel* langer dan de andere!

Uit het tijdsverschil kunnen we de straal der Aarde R schatten; voorlopig

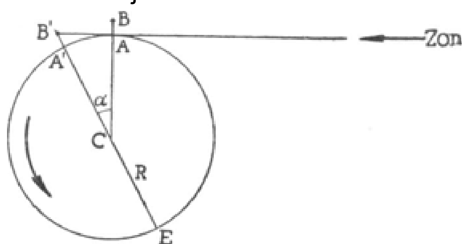


Fig. 16. Twee waarnemers A, B op verschillende hoogte zien de zon niet tegelijk ondergaan.

nemen we aan dat we aan de evenaar zijn op 21 Maart of 23 September. De waarnemer aan het strand ziet de zon ondergaan als hij zich in het punt A bevindt; de waarnemer boven, die eerst in B was, ziet ze ondergaan als hij in B' is gekomen (fig. 16). Tussen deze twee ogenblikken is de Aarde gedraaid over een hoek α. Nu is volgens een meetkundige stelling

$$\overline{B'A}^2 = B'A'$$

. B'E of (voor kleine α): α^2R^2=B'A'. $2R$, dus $R = 2BA/\alpha^2$. De hoek α is onmiddellijk in een tijdsverschil van s sekunden om te zetten, aangezien we over een hoek 2π draaien in 24^h, en dus

$$\alpha = 2\pi \frac{s}{24 \times 3600} = \frac{s}{13800}$$

tijdsekunden. Hieruit zien we dat

$$R = \frac{2BA \,.\, (13800)^2}{s^2}$$

. Theoretisch moet men b.v. bij 10 meter hoogte s = 23 sec vinden, wil R de aardrijkskundige waarde krijgen.

Voor onze gewesten wordt het tijdsverschil 40 tot 50 sekunden, volgens het ogenblik van het jaar. Er komt nog een overweging bij: de lichtstralen worden in onze dampkring een weinig gekromd, op sommige dagen iets meer, op andere iets minder; men brengt dit enigszins in rekening door in plaats van het waargenomen tijdsverschil s slechts het 14/15 daarvan te nemen (**I**, § 34).

Na al deze overwegingen wordt de formule voor ons ongeveer: R = 1 620 000 BA/s^2 kilometer, als de hoogte BA boven de zeespiegel in meters, s in sekunden opgegeven zijn. Ligt de waarnemer op de grond, dan is s = 0. Staat hij op het strand, met zijn oog 2 m boven de zeespiegel, dan wordt s = 22 sekunden; staat hij op een duin en is zijn oog 10 m boven de zeespiegel, dan kan hij s = 50 sekunden verwachten. het zijn wel verrassend grote tijdsverschillen! Uit de afleiding der formule ziet men dat grote nauwkeurigheid in geen geval verwacht kan worden; *het gaat slechts om de orde van grootte*.

Uit de waargenomen tijdstippen s kan men dus de straal der Aarde R schatten. hadden de twee waarnemers hun oog op hoogten h_1, h, zodat alleen het tijdsverschil s_1-s bekend is,

dan past men toe:

$$R = 1\,620\,000 \left(\frac{\sqrt{h_1} - \sqrt{h}}{s_1 - s} \right)^2$$

. Aan de dijk te Zandvoort vonden twee waarnemers, de ene onder, de andere boven, een tijdsverschil van 20 sec; zij schatten *h* = 9m, *h* = 3 m.

Hieruit volgt *R* = 6500 km (juiste waarde: 6368 km).

Onderzoek het voortkruipen van licht en schaduw langs een hoge toren bij zonsondergang.
Het is nuttig te onthouden dat men, op een hoogte *h* boven de zee, zien kan tot een afstand *a*, gegeven door $h = a^2/2R$. Corrigeer voor de gemiddelde straalkromming, reken voor praktisch gebruik *h* in meters, *a* in kilometers; dan wordt $a = 3{,}8\sqrt{h}$. - Bereken aldus hoe ver een bepaalde vuurtoren bij helder weer zichtbaar moet zijn en tracht waar te nemen of dit inderdaad uitkomt.

Spel, sport, vervoermiddelen.[1)]

18. De snelheid van een trein.

Het voorbijvliegen van een sneltrein is altijd een groots schouwspel. De snelheid was vroeger ongeveer 80 km/uur, nu 100 tot 120, straks 140 km/uur; 100 km/uur komt overeen met 100.000/3600 = = 28 m/sec.

In een bepaald geval duurde het voorbijvliegen 5 sekunden. De lengte van de trein moest dus ongeveer 5 × 28 = 140 meter zijn, wat vrijwel uitkwam met het aantal wagens en de lengte van elke wagen.

Als men zelf in de trein zit, is de snelheid op eenvoudige wijze te bepalen. In het dreunen van de wagen is er een sterke, regelmatige rhythmus, dáárdoor veroorzaakt dat de wielen telkens een lichte stoot krijgen bij het overgaan van het ene stuk rail naar het andere. Neem een horloge met sekundenwijzer en bepaal het aantal stoten in 30

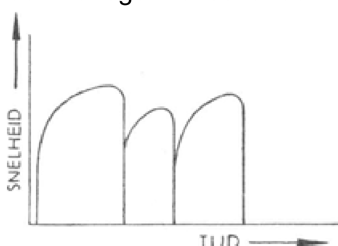


Fig. 17. De snelheid van een lokaaltreintje tussen 4 opeenvolgende stations.

sekunden; dit aantal is evenredig met de snelheid van de trein.

Het is leuk om aldus bij een lokaaltreintje de snelheid om de minuut te bepalen, en die als funktie van de tijd grafisch voor te stellen (fig. 17). Men ziet duidelijk dat tussen twee stations de kurve asymmetrisch verloopt: het op gang brengen duurt langer dan het remmen. Verder is de bereikte maximale snelheid gering als de afstand der stations klein is, groter als de trein veel tijd heeft om op gang te komen.

Vergelijk de snelheid op de baanvakken Utrecht - Woerden en

1) Cassell's Book of Sports and Pastimes (London). - E. Lampe, Mathematik und Sport (Teubner, 1929). - H. Schuppe, Physik der Leibesübungen (Stuttgart, 1941).

Woerden - Gouda: op dit laatste lopen alle treinen langzamer.

Om de snelheid niet alleen relatief, maar in ware waarde te kennen, is het voldoende de lengte van één stuk spoorrail te bepalen. Merk op dat langs onze spoorwegen de afstanden aangegeven zijn door witgeschilderde hektometerpaaltjes, soms alle aan één kant, soms de evene en de onevene afwisselend rechts en links; u herkent ze weldra aan de regelmatige opklimming der cijfers en de gelijke afstanden. Als u nu eenvoudig het aantal stoten per 200 m telt, vindt u eens en vooral uit

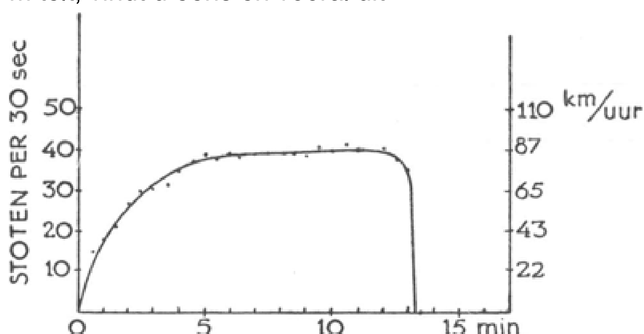


Fig. 18. De snelheid van een sneltrein tussen den Haag en Leiden (1930).

welk type rail de spoorweg daar ter plaatse is samengesteld. Gebruikelijke maten zijn 18 m en 24 m; soms, hoewel zelden, komt het voor dat verschillende maten elkaar reeds op een vrij kort trajekt afwisselen. - Bereken nu de ware snelheid van de trein in meters per sekunde of in kilometers per uur (fig. 18).

Er is een eenvoudige manier, om de snelheid van de trein direkt in kilometers per uur te verkrijgen, zonder dat omrekeningen nodig zijn. Denk u eerst eens kilometerpaaltjes langs het spoor, en een waarnemer die telt hoeveel er van die paaltjes in een uur voorbijvliegen. Ga nu over tot een verkleind model: de kilometer-afstand brengen we terug tot de lengte van een rail, stel l meter; het tijdinterval van één uur verkleinen we in dezelfde verhouding tot een veel kortere tijdsruimte $t = l/1000 \times 1$ uur $= 3{,}6\ l$ sekunden. De eenheid van snelheid ‘raillengten in t sekunden’ is nu gelijk aan de eenheid ‘kilometers per uur’. *Het aantal stoten in de tijd t zal dus gelijk zijn aan de treinsnelheid in kilometers per uur*. - Voor rails van 18 m lengte hebben

we t = 64 sec te nemen; voor rails van 24 m wordt t = 85 sec.
Willen we vlugger tot een resultaat komen, dan tellen we de stoten gedurende 32 of 42 sec en verdubbelen.

Aantal stoten per 30 sec voor een sneltrein tussen Den Haag en Leiden (bepaald om de halve minuut; lengte rail = 18 m).

	15
1^m -	18
	21
2^m -	27
	30
3^m -	30
	31
4^m -	34
	38
5^m -	39
	38
6^m -	39
	38
7^m -	39
	39
8^m -	39
	39
9^m -	38
	41
10^m -	40
	41
11^m -	40
	--
12^m -	40
	37
13^m -	35 }
	0 } 15 sec

Bij het voorbijvliegen van een station met een sneltrein krijgt men altijd de indruk dat de grote snelheid daar veel beter te merken is dan in het vrije veld. Dat ligt eenvoudig aan het feit, dat de sporen in de stations dikwijls onderbroken zijn door wissels en dat de treinrhythmus dus sneller wordt!

Bepaal de snelheid van de trein tussen Dordrecht en Lage Zwaluwe. De brug over de Moerdijk is 1432 m lang; hoe groot is de treinsnelheid op de brug?

19. Richting van stoompluimen.

Als er geen wind was, zou de stoompluim van een trein naar de

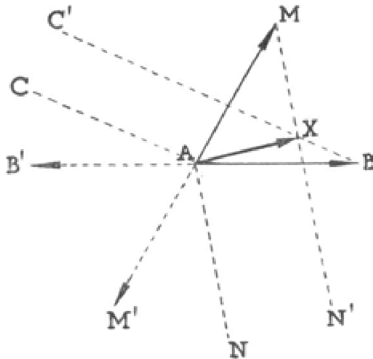


Fig. 19. Verandering der richting van stoompluimen bij wijziging van treinrichting.

tegengestelde richting gericht zijn van die waarin de trein beweegt; 't is dus precies alsof de trein stilstond, maar er een 'schijnwind' waaide, waarvan de snelheid gelijken tegengesteld is aan de werkelijke snelheid van de trein. Is er buiten de schijnwind ook nog een 'echte' wind, dan moet men hun twee snelheden volgens de parallelogramwet samenstellen, en de resultante is de richting waarin men de stoompluim ziet.

Een leuk vraagstuk is het volgende (fig. 19). - Een trein rijdt eerst in een bepaalde richting AB, en we zien dat de stoompluim gericht is volgens AC; vervolgens rijdt hij (met dezelfde snelheid) in de richting AM, en de stoompluim is gericht volgens

AN. Wat is de richting van de ware wind en hoe groot is zijn snelheid? - Oplossing. Bij de eerste waarneming was de schijnwind AB' samengesteld met een onbekende ware wind, zó dat de resultante de richting AC had; men ziet gemakkelijk in, dat de onbekende snelheidsvektor AX, waarvoor dit het geval is, zijn uiteinde X ergens op de lijn BC' // AC zal moeten hebben. En een snelheidsvektor die, samengesteld met AM', een resultante geeft in de richting AN, zal evenzo zijn uiteinde moeten hebben op de lijn MN' // AN. De onbekende windsnelheid, die aan beide voorwaarden voldoet, is dus gericht van A naar het snijpunt X van BC' en MN'; de grootte dezer windsnelheid verhoudt zich tot de treinsnelheid zoals AX/AB. Uit een schatting van de treinsnelheid volgt de windsnelheid.

Twee treinen die elkaar in tegengestelde zin voorbijrijden hebben in 't algemeen verschillend gerichte stoompluimen. Pas op dit geval onze constructie toe.

Controleer de uitkomst als de trein stilstaat!

20. Doorhangende telegraafdraden.

Als kind heb ik mij al verbaasd over die merkwaardige draden die langs het spoor lopen en die ik voortdurend zag stijgen of dalen. Ik behoef wel niet te zeggen dat in werkelijkheid de telegraafdraden in rust zijn, maar telkens tussen twee palen iets dóórhangen, terwijl onze trein er langs rijdt. De vorm van zulk een dóórhangende draad is een langgerekte ‘kettinglijn’, waarvan de vergelijking luidt: $y = e^x + e^{-x}$ (y en x in geschikte eenheden). Van alle vormen die de telegraafdraad tussen zijn twee aanhechtingspunten kan aannemen is dit de kromme met het laagstgelegen zwaartepunt. Deze zelfde lijn treedt op bij bloemfestoenen en telkens als de massa van het lichaam gelijkmatig over de hele lengte verdeeld is.

21. Remmen.

Sluit de ogen terwijl u in de trein zit, en vraag u af of het wel zeker is dat de trein beweegt. - Ja, daar kan geen twijfel aan zijn; we voelen voortdurend schokken, en horen 't geratel en gedruis, dat zelf tot een aantal kleine stootjes terug te brengen is. Toch is het al verrassend moeilijk uit te maken, of u vooruit of achteruit rijdt: u kunt zich zowel het ene als het andere verbeelden. - Stel u nu eens voor dat de beweging geheel zonder

schokken met volkomen eenparige snelheid gebeurde: dan zouden we aan niets kunnen merken dat we bewegen. In een eenparig bewegende treincoupé gebeuren alle natuurverschijnselen net

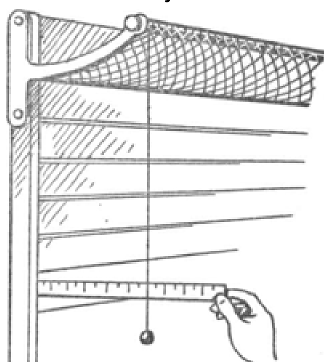


Fig. 20. Het meten van de versnelling op een trein.

precies alsof de trein stilstond: het is het klassieke voorbeeld waar de relativiteitstheorie van uitgaat om haar beginselen aanschouwelijk voor te stellen.

Zodra echter de trein remt of versnelt, merken we wel degelijk iets bijzonders. Alle voorwerpen die enigszins los zijn komen in beweging: tengevolge van hun traagheid maken ze de versnelling of vertraging van de trein slechts in geringe mate mee: deuren slaan, bagage valt om of rolt uit het net, water in een waskom of soep in een bord gaan scheef staan, onze lichamen voelen zich vóóruit of achteruit gedrukt. Quantitatieve metingen kunnen we doen, door een touwtje met een gewicht bij wijze van een slinger aan een stang van het bagagenet op te hangen, en na te gaan of

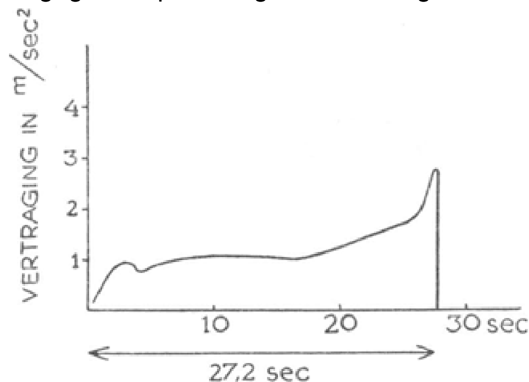


Fig. 21. Vertraging van een remmende trein, automatisch geregistreerd.

dit wel loodrecht naar beneden blijft hangen (fig. 20). Bij plotselinge veranderingen van de versnelling begint de slinger heen en weer te zwaaien, dan is hij niet bruikbaar; we moeten wachten tot zijn uitwijking enkele sekunden dezelfde is gebleven, en dan aflezen. We vinden bij het remmen verplaatsingen van 3 tot 4 cm per meter slingerlengte, in de richting van de treinbeweging, wat dus een (negatieve) versnelling betekent van 0,03 of 0,04 maal die van de zwaartekracht: gemiddeld $981 \times 0{,}035 = 35$ cm/sec^2. Een trein die met een snelheid van 1700 cm/sec rijdt

zou bij een dergelijk remmen na 1700/35 = 50 sec tot stilstand gekomen zijn; bij deze eenparig vertraagde beweging is de remweg ½ . 35 . $(50)^2$ = 44000 cm = 440 meter. Dat is inderdaad een orde van grootte zoals die in werkelijkheid vóórkomt.

Dikwijls is het remproces ingewikkelder. Slechts een ervaren machinist slaagt erin de rem van 't begin af zó aan te zetten, dat de trein precies op 't juiste punt stopt; meestal wordt er geleidelijk meer en meer geremd, alhoewel er ook veel te zeggen is voor de omgekeerde volgorde (fig. 21).

In geval van nood kan de machinist bij het remmen vertragingen tot 75 cm/sec^2 gebruiken, of zelfs nog meer. Dergelijke vertragingen zijn echter al gevaarlijk voor de reizigers, die omgeworpen kunnen worden.

Bij het remmen of aanzetten bewegen een kinderballonnetje, rook van een sigaret en de vlam van een lucifer *in tegengestelde richting* van een vrij opgehangen slinger[1)]! Deze lichamen zijn nml. lichter dan de omgevende lucht, de lucht ondergaat dus meer de invloed der traagheid dan zij en verdringt ze. Het is merkwaardig hoe goed en nauwkeurig zulk een kinderballonnetje als indicator voor versnellingen werkt, vooral als de raampjes dicht zijn en storende luchtstromingen vermeden worden; bij het aanzetten van de trein wordt iedere zuigerslag der lokomotief duidelijk aangewezen: de grote luchtweerstand maakt dat het zich bijna onmiddellijk instelt en op elk ogenblik het juiste bedrag der versnelling aangeeft. - Hoeveel van de mensen die op Zaterdagmiddag met zo'n ballonnetje van een van de grote warenhuizen per trein terugkeren, hebben die eenvoudige waarneming ooit gedaan?

De trein nadert het station, remt .... hoep! daar stopt hij! en op hetzelfde ogenblik vallen de reizigers die al waren opgestaan *achteruit*, - ik bedoel: achteruit ten opzichte van de bewegingsrichting van de trein. Hoe komt dat? Zoudt u niet gedacht hebben dat we integendeel door de traagheid vooruit geduwd moesten worden? Bedenk echter, dat wij ons onwillekeurig schrap stellen tegen de traagheidskrachten zodra we voelen dat de trein begint te remmen; op het ogenblik dat de (negatieve) versnelling wegvalt, worden we door de tegenkracht die we uitoefenden meegesleept.[2)] Dat deze verklaring wel de juiste

1) Lely, Physica, **6**, 313, 1926.
2) H. Weinreich, Zs. math. naturwiss. Unterr. **63**. 118, 1932.

is, blijkt wanneer de trein sterk vaart geminderd heeft, met eenparige beweging rijdt, en dan ineens onverwacht stopt: dan vallen de reizigers *vóóruit*.

Laten we deze feiten nog van een algemener standpunt beschouwen. Zolang de remming geheel gelijkmatig geschiedt en de trein een zuiver eenparig vertraagde beweging uitvoert, ondervinden we daar niet meer last van dan wanneer hij rustig op een helling stond. Wat ons echter het gevoel van een *schok* geeft, dat is als de remming verandert, dus als er *een wijziging van de versnelling* optreedt.

De wijziging van de versnelling is wat de wiskundige aangeeft door het derde differentiaalquotiënt van de weg naar de tijd $d^3x/d\,t^3$. Het is betrekkelijk zelden dat dergelijke hogere differentiaalquotiënten in de natuur een belangrijke rol spelen.
Gezichtsbegoocheling bij het remmen: vgl. **I**, § 105.

22. Bochten in de spoorlijn.

Wie in een trein zit let er meestal weinig op of hij een bocht maakt ofwel rechtdoor rijdt; alleen in de sterkste bochten geeft men er zich rekenschap van, doordat men het landschap ziet draaien. Zodra er zon is, kan men echter letten op de stralen die door de ruitjes naar binnen vallen: bij elke bocht, ook al is die nog zo klein, verschuiven de lichtvlekken op de wand al zeer merkbaar.

Zou men een bocht ook daaraan kunnen merken dat een vrij opgehangen schietlood naar buiten uitwijkt tengevolge van de middelpuntvliedende kracht? Neem de proef met een gewichtje, dat u aan het bagagenet hangt met behulp van een draad wit naaigaren. U zult tot uw verrassing vinden dat in het algemeen zulk een schietlood *niet* naar buiten uitwijkt! Bij een bocht wordt namelijk de optredende versnelling al vóóruit gecompenseerd, doordat de buitenrail iets hoger gelegd is dan de binnenrail (‘*verkanting*’). Ons schietlood ondergaat zelfs soms een kleine afwijking *in tegenovergestelde zin* van wat we hadden verwacht, hetgeen bewijst dat de helling der sporen aan de snelle treinen is aangepast, en voor langzame treinen dus overcompensatie geeft. Men berekent de verkanting gewoonlijk voor een snelheid van ⅞ der maximale. - We hebben hier opnieuw een mooi voorbeeld van de stelling, dat een versnelling dezelfde uitwerking heeft als een gravitatieveld, en er eventueel door opgeheven kan worden: dit ‘aequivalentiebeginsel’ is de grondslag van Einstein's theorie der zwaartekracht.

Onze slinger kan ons echter wel inlichten omtrent de bochten van de spoorlijn, wanneer we hem gebruiken als ‘slinger van Foucault’: daartoe is het voldoende hem in een bepaald vlak aan het slingeren te brengen, bijvoorbeeld zo zuiver mogelijk loodrecht op de lengterichting van de trein. We hebben voor onze proef een punt uitgekozen waar de spoorlijn een scherpe bocht maakt; er mogen echter niet teveel wissels in voorkomen, want die geven schokken. Nu zien we zeer duidelijk hoe het slingervlak draait ten opzichte van de coupé, maar hoe het zijn richting in de ruimte bewaart (t.o.v. het landschap, schaduwen, lichtstrepen). Het mooist is de proef's avonds of in een draaiende tunnel (Gotthardbaan!), omdat dan zo aanschouwelijk wordt bewezen dat slingerwaarnemingen ons kunnen inlichten over onze draaiingen, ook al hadden we geen andere vergelijkingsmaatstaf. Meer dan het demonstreren van het beginsel kunnen we echter niet bereiken, daar de storingen door plotselinge schokken veel te groot zijn.

Na afloop van onze treinreis willen we eens rechtstreeks aan de rails zelf onderzoeken, in welke mate de compensatie door verkanting geschied is. Daarvoor kiezen we een sterke bocht van een goed toegankelijk baanvak. - Als de rails naar de binnenzijde

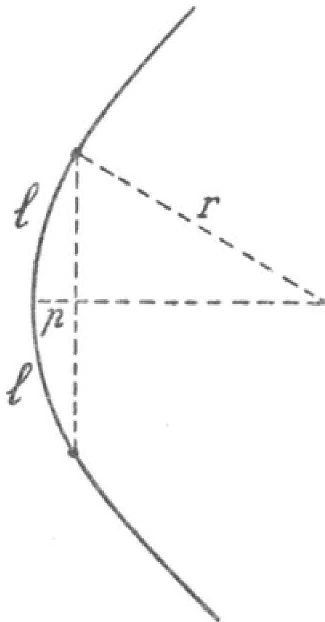


Fig. 22. Bepaling van de kromtestraal van een spoorlijn.

der bocht hellen over een hoekje α, geeft de zwaartekracht een componente αmg, die evenwicht moet maken met de middelpuntvliedende kracht mv^2/r. Hieruit volgt: $v^2/r = \alpha g$, dus $v = \sqrt{\alpha gr}$.

Dwars over de rails leggen we een zuiver rechte lat. Een glazen buis, bijna geheel met water gevuld en dichtgekurkt, dient als waterpas; daarmee bepalen we over welke hoogte h we de lat aan de binnenzij der bocht moeten optillen om ze horizontaal te maken. Aangezien de Nederlandse sporen op 150 cm afstand van elkaar liggen, is $\alpha = h/150$. Om de kromtestraal van de bocht te vinden kiezen we een goed begrensd stuk van gelijkmatige kromming (fig. 22); we meten de lengte $2l$ van de boog door afstappen, de lengte p van

de pijl met een lintmeter. Men ziet gemakkelijk, dat bij benadering $r = l^2/2p$. - Aan een bocht van de spoorweg Bilthoven - Zeist werd gevonden : h = 6,6 cm, dus α = 0,040; $2l$ = 220 m, p = 5,30 m, dus r = 1150 m. De bocht is dus berekend op treinen met snelheid v = 22,3 m/sec of 80 km/uur. Deze snelheid wordt door de treintjes op die lijn wel niet gehaald.

23. Op de tram.

Veel der waar te nemen verschijnselen zijn ongeveer dezelfde als in een trein. De snelheden zijn geringer: tot 25 km per uur; maar de versnellingen zijn van dezelfde orde.

Als 't regent kan een tramreiziger zeer fraai zien hoe het water, dat op het dak van het tramrijtuig gevallen is, door de spijers loodrecht naar beneden stroomt ten opzichte van de tram, precies alsof deze in rust was. Bij versnelling of vertraging gaat de straal afwijken; soms ziet men onder een spijer op de tramruit een hele waaier van al de verschillende valrichtingen. Terwijl dus de stralen van de vrij vallende regen een helling vertonen zodra de tram een zekere snelheid heeft, zien we dat de regen, die eerst op het dak van de tram opgevangen was, daar de horizontale snelheid van de tram overgenomen heeft, en dus bij het neervallen geen horizontale snelheidscomponente ten

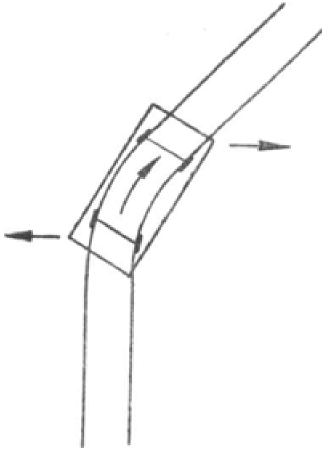


Fig. 23. Beweging van een tramwagen in een bocht.

opzichte van de tram meer vertoont.

Waar moet men op de tram staan om zo weinig mogelijk last te hebben van plotselinge bochten? Wel, bij een bocht worden alle punten van de wagen naar de *binnenkant* van de bocht verplaatst, alleen achter de as van het laatste paar wielen bewegen de punten naar de *buitenkant* van de bocht (fig. 23). Nu is het klaarblijkelijk hinderlijk, als je voeten ineens naar de binnenkant van de bocht getrokken worden, terwijl je hoofd door de traagheid achterblijft en zich meer aan de buitenkant bevindt. Juist de omgekeerde stand is de natuurlijke: de middellijn van het lichaam moet hellen in dezelfde richting als de resultante van zwaartekracht en middelpuntvliedende kracht: Daarom stelle men zich op het achterbalkon, iets achter de achteras, en wel des te verder naarmate de wagen sneller rijdt en scherper bochten

maakt.[1] Het is waar dat voorbij de bocht het achterbalkon een baanvorm beschrijft, geheel symmetrisch van die welke eerst door het vóórbalkon werd afgelegd; maar nu is de passagier al op de bocht ingesteld en kan zich aan de versnelling aanpassen door doelmatig hellen van het lichaam.

24. Versnellingen in een autobus.

We zijn net ingestapt, hebben ons kaartje betaald en begeven ons naar onze plaats. Maar ondertussen heeft de chauffeur de motor al aangezet. Hij schakelt 'de eerste versnelling' in: u hoort het geluid snel stijgen, de wagen krijgt vaart. Dan koppelt hij even de wagen los van de motor en schakelt 'de tweede versnelling' in, die weer een nieuwe stijging van het geluid en van de snelheid veroorzaakt. Dan koppelt hij andermaal los, en schakelt tenslotte de derde versnelling in. - Het merkwaardige is nu, dat we telkens als schokken voelen de ogenblikken waarop de motor ingeschakeld wordt: dàn is het dat we ineens neergesmakt worden op onze bank! Zonder twijfel zijn dit ook *de ogenblikken waarop de versnelling het snelst verandert*. En zo komen we weer tot een besluit dat we ook in een remmende trein al hadden getrokken (§ 21).

Evenzo gaat men wankelen als men toevallig staan moet terwijl de bus een bocht maakt, en de chauffeur in de bocht *de kromming verandert*. Zolang hij niet aan zijn stuurwiel draait, is de kromming constant en de bus beschrijft een cirkelboog. Een draai aan het wiel betekent echter een verandering van de kromtestraal, dus van de middelpuntvliedende versnelling;

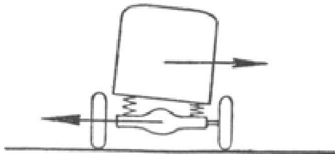


Fig. 24. Overhellen van een autobus in de bocht.

en dat is het wat een gevoel van onvastheid geeft.

Bij een scherpe bocht is de middelpuntvliedende versnelling in een autobus soms bijna onweerstaanbaar. Door een onzichtbare hand wordt men opzij gedrukt, en de wagen helt helemaal over, terwijl zijn veren aan de buitenzij van de bocht sterk ingedrukt worden. De mechanische verklaring is natuurlijk, dat de middelpuntvliedende kracht en de wrijvingstegenstand van de wielen op de weg een koppel vormen, waardoor de autobus om zijn lengteas begint

1) Physica, **5**, 280, 1925.

te draaien, tot de kracht der ingedrukte buitenveren dit koppel compenseert (fig. 24).
Beproef de versnelling in de bocht te bepalen uit de uitwijking van een slinger (§ 21).

25. Het spattende automobielwiel.[1)]

Van de slijpsteen van een scharenslijper ontsnappen de vonken als een bundel vurige stralen *in de richting van de raaklijn*.

De automobilist denkt dat hetzelfde geldt voor de druppels modder die van zijn wielen wegvliegen; en de fietser weet wel hoe zijn rug bespat wordt als er geen spatborden aan zijn fiets zitten, wat hij ook toeschrijft aan een tangentiëel ontsnappen van de druppels - van zijn standpunt, terecht. Maar de voetganger die hen ziet oordeelt enigszins anders: hij ziet het wiel draaien *en tevens vooruitgaan*;

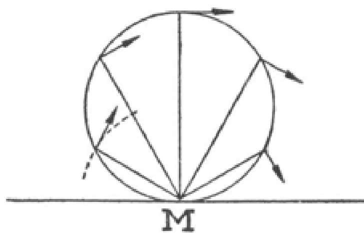


Fig. 25. Beweging der druppels, die van een automobielwiel wegspatten.

bij de tangentiële snelheid van elke druppel komt er dus een voorwaarts gerichte componente die het beeld verandert (fig. 25). Men kan ook zeggen: het wiel draait op elk gegeven ogenblik om zijn tijdelijke draaipunt M, het aanrakingspunt met de grond; om dit middelpunt kan men zich cirkels denken, en aan die cirkels raken de wegvliegende spatten Ze vliegen dus alle naar voren: u kunt als voetganger gerust de modderige straat oversteken, vlak achter een automobiel, zonder dat u bespat wordt. (Maar ik zou toch niet aanraden het te beproeven als er plassen water op de weg liggen!)

26. In een vliegtuig.

Een tochtje boven Schiphol maakt een onvergetelijke indruk. O het grootse vergezicht over de schone Aarde! O de koninklijke weelde van de vliegdaad zelf, van het zweven, van het voorwaarts dringen in de ijle ruimte!

In de bocht ligt het vliegtuig schuin, de zijde van de buitenbocht is het hoogst (vgl. § 22). Deze helling geeft de piloot met opzet: ze is zo berekend, dat de resultante van zwaartekracht en middelpuntvliedende kracht altijd loodrecht op de vloer

1) Pohl, Mechanik und Akusik.

van de cabine werkt, zodat de passagiers niets van de bocht voelen. Als we een horloge aan zijn ketting laten hangen, schijnt de richting van dit schietlood altijd dezelfde ten opzichte van onze kajuit, ook als het vliegtuig een bocht maakt en de gezichteinder voor ons gevoel geheel scheef staat. Het is dus net zo iets als bij een trein in de bocht.

Daarentegen kunnen we de vertikale versnellingen van het vliegtuig gemakkelijk meten (fig. 26). We bevestigen ons horloge

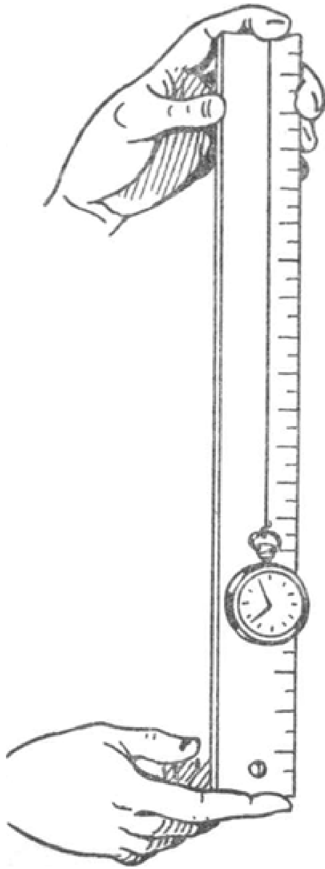


Fig. 26. Meting der vertikale versnellingen in een vliegtuig.

aan een gummisnoertje, dat bijvoorbeeld niet-uitgerekt 10 cm lang moge zijn. Met een duimstok bepalen we vóór ons vertrek, dat het horloge dit snoer tot 19 cm uitrekt, dus een verlenging van 9 cm teweeg brengt. In het vliegtuig zien we nu die uitrekking voortdurend veranderen. Nu eens krijgen we het ellendige gevoel dat we met vliegtuig en al beginnen te vallen, en zien dan ons horloge stijgen van deelstreep 19 tot 17, soms misschien eens tot 15; even later voelen we ons integendeel steviger op onze zitplaatsen gedrukt doordat we versneld opstijgen, en zien we 't horloge schijnbaar zwaarder worden en het snoer tot deelstreep 21 cm uitrekken. Door de schoksgewijze bewegingen van het vliegtuig zou het horloge teveel op en neer dansen, daarom dempen wij het door het zachtjes tegen de duimstok te laten rusten, die we een geringe helling hebben gegeven.

Het is dus alsof de zwaartekracht veranderd was in de verhouding 7/9 tot 11/9 (een enkele maal 5/9); blijkbaar heeft het vliegtuig vertikale versnellingen van ± 2/9 g = 2,20 m/sec^2 gekregen. Dat moeten we zó verstaan: in een sekunde legt het vliegtuig misschien een afstand x = 30 meter af; over die afstand verandert dus de vertikale snelheidscomponente v_z der luchtlagen soms met ruim 2 meter per secunde: $\partial v_z/\partial x$ bedraagt van 0 tot 0,07 sec^{-1}. Bij ietwat buiig weer is dit heel plausibel.

27. Snelheid van een fietser.

We hebben al gezien hoe de trapafstand van onze fiets bepaald kan worden. Deze afstand *f*, vermenigvuldigd met het aantal pedaalomwentelingen per minuut, geeft de per minuut afgelegde weg. Daaruit is de snelheid in km/uur gemakkelijk te berekenen.

Direkter bereiken we ons doel op dezelfde wijze als we dat bij een trein hebben uitgevoerd. We berekenen eens en vooral een tijd *t*, zo gekozen dat het aantal omwentelingen in *t* sec gelijk is aan het aantal km/uur. Neem daartoe:

$$t = \frac{f \times 3600}{1000} = 3{,}6 f.$$

Voor f = 5 m bijvoorbeeld krijgen we t = 18 sec.

28. Dubbele fietssporen.

Het spoor van een fiets is meestal één enkele lijn, klaarblijkelijk vallen de sporen der twee wielen ongeveer samen; slechts hier en daar ziet men één der sporen een bochtje maken en dan weer met het andere versmelten. Waar de weg echter ombuigt ziet men duidelijk hoe het spoor zich over de hele lengte van de bocht verdubbelt; de afstand der twee sporen is des te groter naarmate de kromming

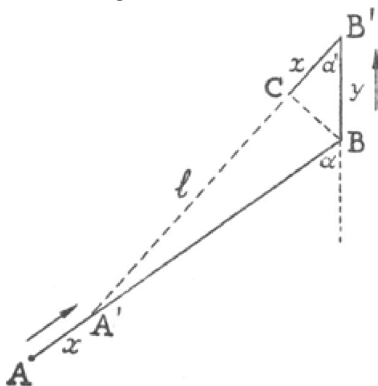


Fig. 27. Berekening van de afstand tussen dubbele fietssporen.

scherper was.

Waardoor precies wordt de afstand der sporen bepaald? We beschouwen een fiets waarvan het achterwiel A gericht is naar het aanrakingspunt B van het voorwiel met de grond, volgens de eis ener goede constructie, en waarvan het voorwiel door den fietser geruime tijd onder een vaste hoek α met AB wordt gehouden (fig. 27). Het is duidelijk dat de fiets nu een cirkel zal beschrijven. Laat het aanrakingspunt A van het achterwiel in zijn vlak een wegelementje AA' = x beschrijven; in dezelfde tijd beschrijft het aanrakingspunt B van het voorwiel een wegelementje BB' = y en de lijn AB gaat over in A'B', terwijl de afstand AB = A'B' = l constant blijft; de hoek α is overgegaan in α' en is daarbij maar heel weinig veranderd, indien x tot een zeer kleine verschuiving beperkt blijft. Trek met A als middelpunt het boogje BC, dat beschouwd kan worden als loodrecht op

AC. Men ziet dat $x = y \cos \alpha$. De fiets is als geheel gedraaid over de hoek

$$BA'B' = \frac{y \sin \alpha}{l}$$

; aangezien niets aan het stuur veranderd wordt, is ook elk der wielen over diezelfde hoek gedraaid. De kromtestraal van het spoor is dus:

$$\frac{\text{weg}}{\text{hoek}} = \begin{cases} \frac{y \cos \alpha}{y \sin \alpha} l = \frac{l}{tg\, \alpha} & \ldots\ \text{achterwiel.} \\ \frac{y}{y \sin \alpha} l = \frac{l}{\sin \alpha} & \ldots\ \text{voorwiel.} \end{cases}$$

Het achterwiel beschrijft dus altijd de binnenbocht. Noem R de kromtestraal van de baan van het voorwiel, dan is de kromtestraal voor het achterwiel $R \cos \alpha$, en 't verschil:

$$R(1 - \cos \alpha) = R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{l^2}{R^2}}\right) \approx \frac{l^2}{2R},$$

als de lengte van de fiets klein is ten opzichte van de kromtestraal der baan. Hiermee is het antwoord op onze vraag gevonden, want het verschil der twee kromtestralen is tevens de afstand tussen de twee sporen, wanneer maar het stuur voldoende lange tijd onder de hoek α wordt gehouden.

Voor een gewone fiets is l = 1,20 m, en de afstand tussen de twee sporen:

$$\frac{1{,}2 \times 1{,}2}{2R} \text{ of } \frac{0{,}72}{R} \text{ meter}$$

. Als het fietsspoor een kromtstraal heeft van R = 7,20 m, is de afstand der sporen dus 0,10 m = 10 cm. Doe metingen aan fietssporen! U zult zien dat onze formule uitkomt. (Voor het bepalen van de kromtestraal van het fietsspoor, vgl. fig. 22).

Als de baan zeer sterk gekromd is, of het stuur wordt snel na elkaar heen en weer gedraaid, is onze eenvoudige opzet niet meer voldoende. Het vraagstuk wordt dan zeer ingewikkeld.

Laat het voorwiel langs een tramrail lopen en het achterwiel bij het begin der beweging een eind daarvan af staan. Het achterwiel nadert nu langzamerhand tot de richting van het voorwiel en beschrijft daarbij een *tractrix*.

29. Absolute en relatieve beweging van de trappers ener fiets.[1)]

Als een fiets in de normale stand op de grond staat, en men drukt de trapper die beneden is *achteruit*, wat zal de fiets dan doen? De fiets is een dóórtrapper, de wielen moeten over de grond rollen, niet wrijven.

1) Physica, **11**, 160, 1931.

Antwoord:

1. als ik dit doe, op de fiets zittend, rijdt de fiets *vóóruit*.
2. als ik dit doe, vast op de grond staande, rijdt de fiets *achteruit*, want de enige kracht die erop werkt is immers naar achteren gericht; de fiets in haar geheel beweegt meer naar achter dan de trapper t.o.v. de fiets naar voren, zodat het netto-resultaat voor de trapper een achterwaartse beweging is.

30. Vergelijking van de trapafstand van twee fietsen.

De trapafstand van onze fiets hebben we al bepaald (§ 1). Nu gaat het om kleine verschillen tussen bijna gelijke fietsen.

Ik rijd naast een ander op een lange rechte weg. We trappen bijna in dezelfde maat; blijkbaar hebben onze fietsen dezelfde trapafstand, wat wel aannemelijk is, daar men thans bepaalde standaardwaarden voor die faktor kiest. Toch schijnt er een heel klein verschil te zijn: na 40 trappen zijn we in tegengestelde phase, na 80 trappen rijden we opnieuw in de pas. Het zijn echte 'zwevingen'. Blijkbaar zijn onze wielen niet nauwkeurig even groot, en bedraagt het verschil 1/80; dit komt overeen met ongeveer 4 mm verschil in straal, hetgeen ten dele te verklaren kan zijn door ongelijk opgeblazen banden.

Wie heeft niet eenmaal 's nachts het geluid der voetstappen gehoord van twee wandelaars, waarvan de ene iets sneller gaat dan de andere? Nu zijn ze gelijk, iets later wisselen ze regelmatig elkaar af, dan stemmen ze weer overeen. Als ze telkens na 15 stappen weer 'in de pas' zijn, betekent dit dat de ene wandelaar 15 stappen doet tegen de andere 14; het aantal stappen per minuut of per uur scheelt 1/15.

31. Omtrek van het fietswiel.

Bevestig aan het ventiel van het voorwiel een stukje papier dat telkens even kleppert als het door de vork gaat. De omwentelingen zijn nu goed op 't gehoor te tellen. Bepaal het aantal omwentelingen per 100 meter: de uitkomst moet ongeveer kloppen met de omtrek die we berekenen uit de middellijn van het wiel (omtrek = 3,14 × middellijn). Vul in!

Vergelijk het aantal trapperomwentelingen en het aantal wielomwentelingen: ze moeten nauwkeurig in dezelfde verhouding staan als het aantal tanden van het kettingrad en dat van de achternaaf.

Dikwijls ziet men hoe een plas op het fietspad zich een aantal keren herhaalt, in de vorm van donkere banden op vaste afstanden van elkaar. Dat is natuurlijk te wijten aan fietsen die met hun wielen telkens iets van het water hebben meegenomen; de afstand der donkere banden is gelijk aan de omtrek van het wiel.

32. Wrijving van de fiets.

Aan ons klepperend stukje papier hebben we een middel om de snelheid van de fiets te schatten, ook wanneer we de voeten niet op de trappers hebben staan. We stellen ons voor, aan onze fiets een flinke vaart te geven, dan de trappers los te laten of te vrijwielen, en daarbij na te gaan hoe de beweging langzamerhand geremd wordt door de wrijving. Het komt er slechts op aan zó geoefend te zijn in het tellen der sekunden, dat men streng de juiste maat blijft houden onafhankelijk van de snelheid waarmee men fietst. Wie dat niet kan moet een helper hebben die naast hem rijdt en luidop telt met het horloge in de hand.

Kies een dag met weinig wind. Geef aan de fiets op een goed horizontale weg een zodanige snelheid dat het voorwiel 4 omwentelingen per sekunde maakt.

Ga dan ineens vrijwielen of laat de trappers los, en tel van dit ogenblik af: 0, 1, 2, ...; onthoud bij welke tellen de snelheid zo verminderd was dat het voorwiel slechts 3, 2, 1, ½ omwenteling per sekunde meer maakte. Herhaal de proef enige malen op dezelfde weg, zowel heen als terug doorlopen om mogelijke hellingen en windinvloeden onschadelijk te maken, en middel de uitkomsten.

Bij een bepaalde reeks proeven werden aldus de kolommen 1, 2, 3 van onderstaande tabel verkregen; in fig. 28 is grafisch uitgezet hoe de snelheid *v* in de loop van de tijd *t* afneemt. Uit deze kromme halen we de (negatieve) versnelling door een aantal raaklijnen aan de kromme te trekken, en hun helling op de tekening te meten (kolom 4).

Snelheid in omwentelingen per sec	**Snelheid *v* in m/sec**	**Tijd *t***	**Vertraging**
4	8	0	0,50 m/sec^2
3	6	4,7	0,32 m/sec^2
2	4	14,5	0,21 m/sec^2
1	2	26	0,14 m/sec^2
0,5	1	36	0,08 m/sec^2

Deze vertraging is veroorzaakt door de wrijving; wordt de wrijving 2 maal groter, dan verdubbelt ook de vertraging. Zet deze vertraging uit tegen de snelheid: u ziet dat er reeds een wrijvingsweerstand is bij de allerlangzaamste beweging van de fiets, maar dat de weerstand aanzienlijk toeneemt naarmate de fiets sneller beweegt. Bij onze proef is de vertraging in m/sec^2 ongeveer voor te stellen door de uitdrukking 0,08 + 0,0066 v^2. Klaarblijkelijk is 0,08 de wrijving in de assen van de fiets en tegen de grond, welke slechts weinig van de snelheid afhangt; 0,0066 v^2 echter is de luchtweerstand van fiets en fietser, die

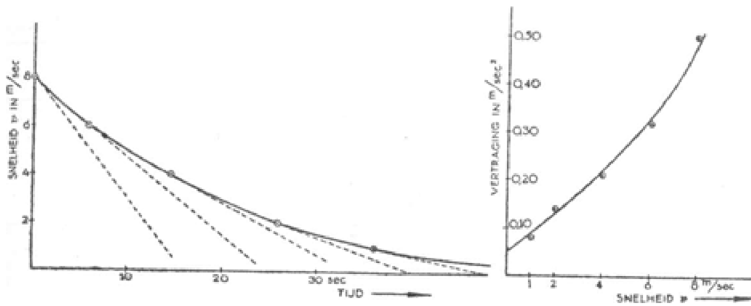


Fig. 28. Vertraging van een fiets die vaart heeft gekregen en aan zichzelf wordt overgelaten.

zoals de meeste dergelijke luchtweerstanden ongeveer evenredig met het kwadraat van de snelheid toeneemt. Voor een snelheid van 1 m/sec is de luchtweerstand van een fietser dus ongeveer 1/9,81 × massa × versnelling = 1/9,81 × 100000 × 0,0066 = 67 gramgewicht (100 kg = massa van fietser + fiets)[1)].

Welk een *eindsnelheid* krijgt een fiets op een zeer lange helling, in de onderstelling dat men de trappers niet gebruikt? - Antwoord: *de eindsnelheid is bereikt*, *als de versnelling tengevolge van de zwaartekracht precies wordt opgeheven door de wrijving*. Op een helling van 3% bijvoorbeeld bedraagt de versnelling door de zwaartekracht 9,81 × 0,03 ≈ 0,30 m/sec^2; en uit fig. 28 lezen we af dat die door de wrijving wordt opgeheven wanneer de snelheid ongeveer 5,4 m/sec heeft bereikt. Dit is dus de gevraagde eindsnelheid.

Zoek een terrein met lange, gelijkmatige helling, en zie of de

1) In het C.G.S.-stelsel: weerstand = massa × versnelling = 10^5 × 0,66 dyne.

verwachte eindsnelheid bereikt wordt. Het verschijnsel is in de grond hetzelfde als dat waardoor regendruppels hun eindsnelheid bereiken: u kunt u nu zelf voelen als een regendruppel die aan 't vallen is!

Als de fietser eenmaal de snelheid bereikt heeft die hij wenst, dient zijn arbeid alleen om de wrijvingen te overwinnen. We lezen dus uit onze kromme af, dat hij bij een snelheid van 12 km/uur of 3,33 m/sec de wrijvingsvertraging 0,17 m/sec^2 heeft te overwinnen. Schat de massa op 100 kg; dan is de te ontwikkelen *kracht* = 1/9,81 × massa × versnelling = 100 × 0,17/9,81 = = 1,7 kg-gewicht[1)]; de *arbeid per sekunde* = kracht × weg (per sec) = 3,33 × 1,7 = 5,7 kgm per sekunde = 1/13 paardekracht.

33. Rechtstreekse bepaling van de wrijving op een fiets.

Bij deze proef moeten we een helper hebben. Hij krijgt een lang touw in de hand, waaraan we enige gummi-elastiekjes bevestigd hebben zoals ze gebruikt worden voor verpakking. Dan stijgt u op uw fiets, grijpt de gummisnoertjes, en laat uw helper hard voor u uit lopen, terwijl u zelf niets anders te doen heeft dan te vrijwielen, te sturen, en te schatten hoe sterk de snoertjes uitgerekt zijn.

Hoe eenvoudig de proef moge lijken, toch zijn enkele kleine aanwijzingen wel nuttig. Reeds bij de eerste pogingen zult u merken hoe nodig het is een volmaakt vlakke en effen weg uit te kiezen; de wind veroorzaakt altijd storing, men doet de proef liefst op een windstille dag, en in elk geval doorloopt men de baan altijd in de ene zowel als in de andere richting. Degene die trekt, moet trachten *een constante kracht* uit te oefenen, desnoods ten koste van kleine ongelijkmatigheden in de snelheid waarmee hij loopt. Als de fietser merkt dat de snoertjes te weinig uitrekken, laat hij er enige los, tot de verlenging bijvoorbeeld de lengte verdubbelt.

Tehuis kunnen we dan gewichten aan onze snoertjes hangen, om uit te maken welk een kracht nodig was om ze zover uit te rekken.

Bij een snelheid van 8 km per uur vond ik dat een kracht van 430 g-gewicht vereist was, voor een fietser die samen met zijn fiets 80 kg woog. Uit onze vorige metingen zou gevolgd zijn:

1) In het C.G.S.-stelsel: kracht = massa × versnelling = 10^5 × 17 dyne.

900 g-gewicht. Vindt u het verschil erg? Bedenk dat de fiets een andere was dan die waaraan de eerste bepaling werd uitgevoerd; de weg was met mooie vlakke tegels bevloerd. Ik vind de overeenstemming niet kwaad, en ik denk dat u het met mij eens zult zijn als u zelf enkele proeven over wrijving heeft genomen!

34. Evenwicht op de fiets.[1)]

De ranke evenwichtskunst van den fietser is terug te brengen tot dit grondverschijnsel: als

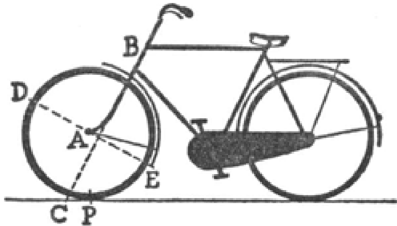


Fig. 29.

de fietser naar rechts dreigt om te vallen, draait het stuur zich vanzelf naar diezelfde kant, de fiets maakt een bocht, en door de middelpuntvliedende kracht blijft de fietser voor een val behoed. Evenzo (mutatis mutandis) bij een overhellen naar links.

Vraag: *waarom* draait het stuur juist op het goede ogenblik naar rechts? Men zou geneigd kunnen zijn dit toe te schrijven aan handigheid van den fietser, maar daartegenover staat dat hetzelfde ook gebeurt als men het stuur loslaat en met losse handen rijdt. De ware reden is eenvoudig, dat het punt P waar het voorwiel aan de grond raakt altijd iets achter de draaiingsas BC van de vork ligt (fig. 29): ga dit bij uw eigen fiets na! Helt de fiets naar rechts, dan zal dus in de figuur het wiel in zijn aanrakingspunt een druk van de grond ondervinden loodrecht op het vlak van tekening, en wel naar den toeschouwer toe, dus zó dat het wiel zich met het stuur naar rechts keert.

Sommigen beweren, dat de allereerste beweging die men maakt, als men naar rechts wil zwenken, iets ingewikkelder is, en daarin bestaat dat men het stuur eerst plotseling even *naar links* wendt; het lichaam volgt die beweging niet ineens, helt dus naar rechts over, enz. Deze eerste beweging is zeer snel en zou bijna onbewust geschieden. Bij een driewieler bestaat zulk een complicatie natuurlijk niet, en daardoor is het voor een

1) G.T. Walker Enz. d. mathem. Wiss. IV, 9, blz. 145. - P, Appell, Traité de mécanique rationelle, **2**, 267, 1904 (deels verouderd). - Klein-Sommerfeld, Theorie des Kreisels, blz. 863 (Teubner 1893-1910).

fietser een vreemd gevoel wanneer hij voor 't eerst op een dergelijk ding zit en beproeft te sturen.[1)]

Dikwijls heeft men ook gedacht aan gyrostatische krachten, en het is inderdaad gebleken dat die een weinig meehelpen. Want het draaiende fietswiel is een zware tol; en *een tol die om as A draait, en om as DE begint te kantelen* (op het ogenblik dat de fiets naar rechts gaat overhellen), *heeft de neiging om tengevolge van die twee draaiingen ook om de as BC te draaien*, *loodrecht op de twee vorige*. De richting der draaiing is in dit geval inderdaad zo, dat het stuur naar rechts gekeerd wordt. - Hoewel uit de berekening blijkt dat deze gyrostatische krachten gering zijn, helpen zij toch de zwaartekracht om het stuur te wenden, en wel 'op bijzonder intelligente wijze!' Want terwijl de drukking van het wiel tegen de grond slechts in werking treedt als de helling ϑ van de fiets een merkbaar bedrag bereikt, hangen de gyrostatische krachten af van $d\vartheta/dt$, en treden dus reeds in werking zodra de fietser *de neiging* vertoont om te hellen. Is eenmaal het stuur gedraaid, dan zorgen de sterke middelpuntvliedende krachten wel voor het weer oprichten van de fiets.

De algemene behandeling van de beweging van de fiets is zeer moeilijk. Als men aanneemt dat het lichaam van den fietser een starre massa is, geeft de theorie het resultaat dat rijden met losse handen niet mogelijk is bij kleine snelheden; slechts bij een vaart groter dan 16 km/uur zouden de gyrostatische werkingen sterk genoeg zijn om de beweging stabiel te maken. Boven 20 km/uur zou de beweging dan weer labiel moeten worden: na een lichte draaiing van het stuur neemt het achterwiel nu zó snel dezelfde stand als het voorwiel aan, dat de fiets praktisch te beschouwen is als een star geheel; gyrostatische stabilisatie is echter slechts mogelijk wanneer de gyrostaten *al* hun bewegingsvrijheden bezitten. De proefondervindelijke ervaring is daarentegen, dat rijden met losse handen des te beter gaat naarmate de snelheid groter wordt. De vergelijking met de theorie leert dus, dat er kleine, onbewuste lichaamsbewegingen nodig zijn om het evenwicht te bewaren, en wel vooral bij de kleine en bij de grote snelheden.

35. Lift.

Het zonderlinge, nare gevoel bij vertrek en bij aankomst van dit stijgende en dalende ding is natuurlijk weer een gevolg van de sterke vertikale versnellingen of vertragingen. Als u

1) Physica, **4**, 188, 1925.

omhoog gaat, lijkt de zwaartekracht bij het vertrek versterkt, bij aankomst verzwakt; als u daalt is het omgekeerd.

Om de versnellingen te schatten, doen we evenals in het vliegtuig (§ 26): we hangen een gewichtje aan een niet te kort elastiekje, en onderzoeken hoe de uitrekking van het snoer verandert als we ons met de lift bewegen. Al naar gelang van de richting der versnelling lijkt het gewichtje zwaarder of minder zwaar. Zolang de verschillen klein zijn, kunnen we aannemen dat de uitrekking evenredig is met de uitrekkende kracht; het is echter wel veilig om rechtstreeks te bepalen hoeveel korter of langer het snoertje wordt als men een extra-gewichtje wegneemt of toevoegt.

We vinden aldus versnellingen van de orde 0,2 *g* bij het vertrek, 0,4*g* bij de aankomst; de eerste zijn altijd merkbaar geringer dan de laatste, onverschillig of we stijgende of dalende zijn. Onze bepalingen zijn echter onzeker, omdat zich hier de moeilijkheid voordoet dat de versnellingen zo uitermate kort duren; dan begint ons gewichtje op en neer te dansen, en het is duidelijk dat ons eenvoudig toestelletje dan niet betrouwbaar meer werkt: het is niet gedempt.

36. Wrijving van schaatsen over het ijs.

Laat een schaatsenrijder een touw vastgrijpen waaraan een veerbalansje bevestigd is, en trek hem zachtjes over het ijs voort. Indien de wijzer geen merkbare kracht aanwijst, vervang dan het veerbalansje door gummidraadjes. - Lees nog eens nauwkeurig hoe we de wrijving van de fiets op een dergelijke wijze hebben bepaald (§ 33), maar tracht de snelheid zo gering als enigszins mogelijk te houden.

Het is moeilijk de kracht die we uitoefenen precies af te lezen, maar ook een benaderde waarde volstaat al. Wel verrassend, zulk een geringe kracht als reeds voldoende is om een zwaren man voort te trekken! Het quotiënt

$$\frac{\text{trekkracht}}{\text{gewicht van den schaatsenrijder}}$$

is *de wrijvingscoëfficiënt* van staal op ijs (we verwaarlozen de luchtweerstand). Om de wrijving bij het eerste bewegen te overwinnen, is er altijd een iets grotere kracht nodig dan om de tot stand gekomen beweging te onderhouden; men onderscheidt daarom ‘wrijvingscoëfficiënt in rust’ en wrijvingscoëfficiënt in beweging’.

De gewone wrijvingscoëfficiënten van vaste stoffen op elkaar liggen meestal tussen 0,10 en 0,80; voor goed ingevet ijzer op

eikenhout daalt hij tot 0,08. De veel geringere waarde voor den schaatsenrijder wijst er op dat hier een bijzonder verschijnsel optreedt (vloeibaar worden van het ijs onder hoge druk: vgl. **II**, § 197 bis).

Bepaal insgelijks de 'wrijvingscoëfficiënt' voor rolschaatsen op beton.

37. De arbeid van een watermolen.

Aan een der schilderachtige watermolens, die nog op een aantal plekjes van ons land voorkomen, kunnen we gemakkelijk bepalen hoeveel arbeid zulk een werktuig levert. Schat hoeveel water per sekunde door het kanaal stroomt dat de molen voedt (§ 75) en schat ook de hoogte van dewelke het water naar beneden valt. Meer is niet nodig; het mooie van de redeneringen aan de hand van het begrip arbeid is, dat men de afzonderlijke schakels van het bestudeerde proces niet behoeft te kennen, maar dat het voldoende is, de eindtoestand met de begintoestand te vergelijken.

Het produkt van de dóórstromende watermassa in kg met het hoogteverval in meters geeft de theoretisch beschikbare energie in kilogrammeters. De feitelijke arbeidsprestatie is slechts de helft daarvan ongeveer, daar de bakjes het water ten dele laten uitstromen eer ze beneden aangekomen zijn. Het *vermogen* van de watermolen is de geleverde arbeid per sekunde; we meten die in de eenheid *paardekracht* = 75 kgm per sekunde.

38. Pijl en boog.

Een prachtig voorbeeld van de omzetting der energie! De potentiële energie van de gespannen boog gaat over in kinetische energie van de pijl; en die wordt weer omgezet in potentiële energie, meer en meer, tot de pijl het hoogste punt van zijn baan bereikt heeft; als hij terugvalt wordt ze weer kinetische energie; en tenslotte, als hij de grond treft: warmte.

Kunnen we de omzettingen van het arbeidsvermogen niet volgen en meten? Aan een boog te komen voor zulke proefjes is niet zo gemakkelijk meer in onze beschaafde maatschappij, waar men (terecht!) zulk kinderspeelgoed als vrij gevaarlijk beschouwt. Als wij er geen meer vinden in de winkel, maken wij er zelf een van essenhout of eikenhout; afmetingen: 100 cm × 2 cm × 1 cm tot 150 cm × 2 cm × 1 cm; hij moet kunnen buigen tot de doorbuiging bijvoorbeeld 5 cm bedraagt. Een touw tussen de uiteinden, iets langer dan het hout. Een pijl met een paar veertjes. - We zijn klaar!

Om te beginnen gaan we bepalen *hoeveel arbeid verricht moet*

worden bij het spannen van de boog. We zetten langs de pijl een schaal van potloodstreepjes op 1 cm van elkaar; om de 5 streepjes staat er een bijzonder teken, bv. een kruisje. Nu wordt de boog gespannen met behulp van een veerbalans, terwijl hij tegengehouden wordt door een paaltje; de linkerhand houdt de pijl precies op het laagste punt van het touw, vlak naast de haak van de veerbalans (fig. 31*a*). Voor iedere stand van de veerbalans, opklimmend met 1 kg, wordt afgelezen bij welk schaaldeel de boog de pijl kruist; telkens vóór het aflezen wordt de boog eerst even te veel, dan te weinig aangetrokken, om wrijvingen te vermijden.

Bij mijn proef nam de uitwijking *l* vrij geregeld toe voor iedere aangroeiing van de kracht *k* met 1 kg, zodat ik daaruit gemakkelijk



Fig. 31*a*. Het meten van de kracht, nodig voor het spannen van een boog.

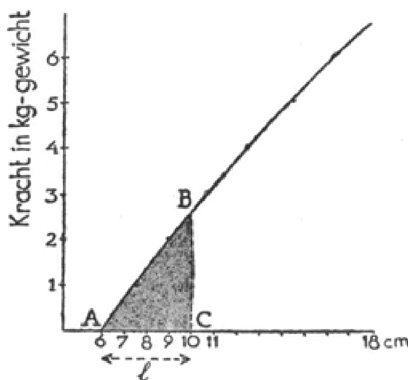


Fig. 31*b*. Het bepalen van de arbeid, nodig voor het spannen van een boog.

kon afleiden welke schaalwaarde ik had te nemen voor een kracht 0 (in dit geval: schaaldeel 6). Bij harder aantrekken werd de uitwijking *meer* dan evenredig met de kracht, ongeveer volgens het formuletje:

$k = 0{,}67l - 0{,}01l^2$.

In het arbeidsdiagram fig. 31*b* is de arbeid om de pijl 4 cm te verplaatsen voorgesteld door het oppervlak ABC, of ongeveer

$$\frac{4 \times 2{,}7}{2} = 5{,}3 \text{ kg-gew.} \times \text{cm} = 5{,}3 \,.\, 10^6 \text{ erg}.$$

Uit ons formuletje zou men vinden:

$$\int_0^4 kdl = \int_0^4 0{,}67\frac{l^2}{2} - \int_0^4 0{,}01\frac{l^3}{3} = 5{,}1 \,.\, 10^6 \text{ erg}.$$

Nu gaan we kijken *hoeveel arbeidsvermogen de boog aan de pijl geeft*! We wegen de pijl en vinden: 6 g. In de tuin trekken we de boog aan tot de pijl juist over 4 cm verplaatst is, schieten loodrecht omhoog, en vragen een helper van op afstand te schatten hoe hoog de pijl vloog, vergeleken met ons huis bijvoorbeeld; de hoogte van ramen, goten, dak meten we gemakkelijk met een duimstok. Bedenk nog dat de pijl niet vertrokken is van op de grond, maar van een hoogte van ongeveer 1,90 m.

Arbeid: $mgh = 6 \times 981 \times (550 - 190) = 2{,}1 \, . \, 10^6$ erg. Drie proeven gaven aldus:

uitwijking van de pijl	**arbeid voor het spannen**	**bereikte hoogte**	**arbeidsvermogen van de pijl**	**nuttig effekt**
3 cm	$2{,}87 \, . \, 10^6$ erg	4,00 m-1,90 m	$1{,}24 \, . \, 10^6$ erg	43%
4	5,0	5,50 m-1,90 m	2,12	42%
5	7,7	6,50 m-1,90 m	2,71	35%

De metingen zijn verre van nauwkeurig en zouden gemakkelijk beter kunnen gebeuren. Toch is het leuk hoe we een zeer plausibel getal krijgen voor het nuttig effekt; de energie gaat gedeeltelijk verloren in boog en touw, gedeeltelijk in de luchtweerstand door de wegvliegende pijl ondervonden. Zelfs kan men zien dat de energie-omzetting des te onvoordeliger is naarmate men hoger schiet: een steeds groter breukdeel wordt omgezet in warmte door wrijving tegen de lucht, want die wrijvingsweerstand neemt eerst evenredig met de snelheid toe, daarna evenredig met het kwadraat ervan.

Herhaal eens deze proeven met een echte sportboog van een boogschutter!

39. De mens als motor.

We hebben gevonden dat een fietser bij betrekkelijk matige snelheid 1/13 PK ontwikkelt. Bepaal eens het vermogen van een bergbestijger, door een hoge toren te beklimmen, en op te nemen hoeveel tijd dat kost. Baedeker geeft op dat men 320 m per uur kan klimmen, de Oostenrijkse soldaten rekenen 300 m. Stel voor het gewicht van een man 75 kg, voor zijn bagage 10 kg, dan is het vermogen: 85 × 310 kgm per uur = 1/10 PK. Dit komt overeen met oudere resultaten van Coulomb en Borda.

Op een lange helling neemt men aan dat de totale tijd bestaat uit een gedeelte voor het afleggen van de horizontale afstand

(à 5 km/uur); en uit een gedeelte dat voor het stijgen gebruikt wordt. Dit laatste kan men dus schatten.

Op een horizontale weg moeten we arbeid verrichten, doordat we bij iedere stap ons lichaam een weinig opheffen; de arbeid van het weer neervallend lichaam wordt ons natuurlijk niet teruggegeven. Het is bekend dat het zwaartepunt van ons lichaam ergens in de buurt van de nieren ligt; houd een stukje krijt op de hoogte van de heup en loop langs een muur: beoordeel uit de slingerlijn hoeveel dit gedeelte van ons lichaam bij elke stap opgeheven wordt, tel uw stappen per sekunde en bereken daaruit de arbeid. Voorbeeld: 75 kg worden om de 0,7 sec over 2 cm opgeheven; vermogen = 75 × 0,02 / 0,7 : 75 = 1/35 PK. - In werkelijkheid is de arbeid voor het lopen op een vlakke weg aanzienlijk groter, vooral omdat aan de benen telkens een bepaalde snelheid gegeven moet worden. Er wordt zelfs geschat dat de arbeid voor het afleggen van een horizontale afstand *s* overeenkomt met die voor het stijgen over een hoogte *s*/12; voor 75 kg en 5 km/uur zou dit een vermogen betekenen van 75 . 5000/3600 . 1/12 : 75 = 1/9 PK. Dit lijkt hoog. Direkte bepalingen hebben opgeleverd: bij een snelheid van 5 km/uur, 1/12 PK; bij 7 km/uur, ¼ PK.

Gedurende een kort tijdsbestek kan de arbeidsprestatie nog aanmerkelijk opgevoerd worden. - Beproef eens, snel een aantal malen na elkaar neer te hurken en weer rechtop te gaan staan. Uw gewicht, zonder de benen, schatten we op 60 kg; de afstand waarover u het zwaartepunt van uw lichaam telkens moet optillen is ongeveer 0,40 m. Als u dit éénmaal in de sekunde uitvoert, levert u een vermogen van 24 kgm/sek = 0,32 PK. - Een geoefend athleet loopt in 4 sekunden een trap op tot een hoogte van 6 meter, en on twikkelt dus een vermogen van 1,5 PK. - Bij het afzetten voor een sprong wordt aan ons lichaam een snelheid medegedeeld die tot 4,5 m/sec bedragen kan; in een tijd, die wellicht op ⅓ sec te schatten is, wordt dus een arbeidsvermogen voortgebracht van ½ . 75/9,81 . $(4,5)^2$ = 75 kgm; er is dus een vermogen ontwikkeld van 3PK.

Vergelijk proefondervindelijk het vermogen dat de mens leveren kan als hij trappen bestijgt *a*) wanneer hij zwaar beladen is, en *b*) wanneer hij onbelemmerd is in zijn bewegingen.

40. Zweefmolen.

Zweefmolens in verschillende variëteiten vertonen ons de wedstrijd tussen zwaartekracht en middelpuntvliedende kracht. Naarmate de omwentelingssnelheid groter



Fig. 30. Evenwichtsvoorwaarde van een zweefmolen.

wordt, bewegen de zwevend opgehangen schuitjes verder en verder naar buiten en ziet men de staaf waaraan ze hangen meer en meer hellen.

In een bepaald geval was de omwenteltijd 6 secunden, en weken de schuitjes tot 2 m van de as af. Ze beschreven dus een cirkel van ruim 12 m omtrek, met een snelheid van 12/6 = 2 m/sec. De versnelling der middelpuntvliedende kracht AD was dus: $v^2/r = 2 \times 2 / 2 = 2$ m/sec^2; de versnelling der zwaartekracht AB was $g = 9{,}81$ m/sec^2. De verhouding dezer twee versnellingen is tevens de verhouding der twee krachten.

Wil er evenwicht zijn, dan moeten de ophangingsstangen zich instellen in de richting van de resultante, dus zo dat AP/OP = AD/AB = 2/10 (fig. 30). Dit kwam voor zover men zien kon vrij behoorlijk uit.

41. De middelpuntvliedende kracht voor een hardloper.[1)]

Een goede hardloper loopt 100 meter in 11 tot 12 sekunden; hij heeft dus een snelheid van 8 m/sec. Bij de normale vorm van een sportbaan van 400 m lengte variëren de kromtestralen der bochten aan de uiteinden tussen 24 m en 48 m, volgens het gedeelte van de bocht dat men beschouwt. De versnelling der middelpuntvliedende kracht bedraagt dus $(8{,}5)^2/24$ tot $(8{,}5)^2/48$ m/sec^2. Vergelijk dit met de versnelling der zwaartekracht: 9,81 m/sec^2. De verhouding der versnellingen is tevens de verhouding der krachten die op den hardloper werken: 0,31 tot 0,15. Dit is dus ook de helling waaronder de hardloper helt bij het nemen van de bocht; beproef die te schatten tijdens een wedstrijd!

Eigenlijk moest de baan onder diezelfde hoek scheef liggen,

1) E. Lampe Mathematik und Sport (Teubner 1929), blz. 1-10.

maar de ervaring heeft bewezen dat dit onmogelijk is, omdat de regen dan onder een te steile helling wegstroomt, voren in het terrein graaft, en de as wegspoelt. In 't algemeen hellen de banen ten hoogste 4 cm per meter, dus 0,04.

42. Onveranderlijkheid van het draaiimpuls bij turnoefeningen.

Buiten in een speeltuin hangen een paar ringen voor turnoefeningen. We grijpen ze en draaien ons enkele malen om onze as, zodat de touwen om elkaar gewikkeld zijn. Nu laten we ons aan de ringen hangen: de touwen wikkelen zich los en we draaien lustig rond om onze eigen as. De proef bestaat hierin, dat we de benen, die we eerst ver naar rechts en links hadden uitgestoken, nu plotseling naar de as terugtrekken, zodat ons traagheidsmoment vermindert: onze omwentelingssnelheid wordt op dit ogenblik ineens groter; *het produkt van traagheidsmoment en hoeksnelheid*, *het* '*draaiimpuls*', *is onveranderd gebleven*.

Is onze draaiing tamelijk snel, dan bemerken we nog een ander verschijnsel: het lichaam vertoont de neiging, zich scheef in te stellen; bij zeer snelle draaiing zou het zelfs de horizontale stand innemen. We zeggen dat onze lengte-as geen 'vrije as' is: de rotatie om die as is een labiele beweging, het draaiende lichaam heeft de neiging er steeds verder van af te wijken.

Hang u aan één enkele ring met gestrekt lichaam. Hef één been zo ver mogelijk naar boven, houd het gestrekt, beweeg het snel naar rechts, dan naar achteren: het beschrijft dus een halve cirkel ten opzichte van het lichaam. Tegelijk echter is het lichaam zelf ongeveer ⅜ slag in tegengestelde richting gedraaid, ten opzichte van de rustende omgeving is het been dus slechts ⅛ slag naar rechts gedraaid.

Dergelijke proeven kunnen we ook zonder ringen uitvoeren. Stel u op een effen, vrij terrein, draai u enige malen om uw as met wijd uitgestrekte armen, en trek dan ineens de armen in. Niettegenstaande de wrijving van de voeten op de grond voelt u toch duidelijk hoe de omwentelsnelheid ineens toeneemt.

Het schijnt dat een schaatsenrijder om zijn vertikale as kan draaien, als hij goed afgeronde kunstrijschaatsen aan heeft en zijn voeten krachtig tegen elkaar aan drukt. Wellicht kan een helper hem beet pakken en een flink draaiimpuls geven. Als hij nu zijn armen zijdelings uitsteekt moet zijn omwentelsnelheid aanzienlijk verminderen; en omgekeerd. - Ik heb dit niet beproefd!

Weer op andere wijze wordt van het beginsel gebruik gemaakt bij de oefeningen aan het vaste rek. De turner, die aan de stang hangt, begint met eerst in schommelende beweging te komen. Daartoe heft hij de gestrekte benen vóór zich uit, en drukt tevens de armen naar beneden: het zwaartepunt verplaatst zich dan achterwaarts en stijgt. Nu volgt vanzelf de voorwaartse zwaai, weldra is de schommeling voldoende versterkt, en de turner kan beproeven zich hoger op te werken. Direkt na het voorste omkeerpunt heft hij zijn voeten tot de hoogte van de rekstang en weer even later stoot hij de voeten naar voren, het hoofd naar achteren, zodat het lichaam horizontaal en rechtuit gestrekt wordt. Aldus komt het zwaartepunt dichter bij de stang, het draaiimpuls wordt versterkt, en de turner kan zover opwaartskomen dat hij nu op vertikaal naar beneden gestrekte armen steunt (‘streksteun’). - Een andere, moeilijker manier bestaat daarin, dat het lichaam bij het achterwaarts schommelen vertikaal gestrekt hangend door de middenstand gaat, en van dan af vertikaal blijft. Door de draaiing komt ook nu het zwaartepunt dichter bij de stang, het draaiimpuls wordt versterkt, en de hogere stand wordt bereikt.

43. Het werpen van speer, kogel, bal, enz.[1)]

Bij de geringe snelheden en het grote soortelijk gewicht van die voorwerpen speelt de luchtweerstand slechts een geringe rol en is de baan de zo geliefde ‘kogelbaan’ onzer schoolvraagstukjes.

Het is welbekend dat de officiële kogelbaan onder 45° opstijgen moet om een zo groot mogelijke dracht te bereiken. Dit is echter weer een van de vele gevallen, waarin de werkelijke omstandigheden heel ver van de onderstellingen der schoolmechanica verwijderd zijn! Neem proeven op het sportterrein; span een touw op 4 m hoogte, en laat degene die werpt eerst dicht bij het touw, dan verder en verder gaan staan, terwijl hij telkens opdracht krijgt, vlak langs het touw te gooien, en zo hard hij kan. Op die wijze krijgt u proeven bij allerlei stijghoeken, en zult stellig vinden, dat de gunstigste hoek ver beneden 45° blijft, meestal in de buurt van 30°.

Dit ligt voor een klein gedeelte aan het feit dat de worp op een hoogte *h* begint, maar op een hoogte 0 eindigt, wat in de 45° -formule niet in rekening gebracht was. De hoofdzaak is

1) E. Lampe: Mathematik und Sport (Teubner 1929). - E. Lampe, Zs. math. naturwiss. Unterr. **58**, 1927 en **59**, 1928. - K. Bögel, Zs. math. naturwiss. Unterr. **59**. 48, 1928. - Zs. phys. chem. Unterr. **49**. 204, 1936.

echter, *dat de beginsnelheid v geen constant getal is*, maar sterk van de stijghoek afhangt! Blijkbaar is hier niet alleen de physica, maar ook de physiologie van ons lichaam bij betrokken, waardoor de beweging van het werpen beter in de ene dan in de andere richting gelukt.

Men kan aantonen, dat de beginsnelheid

$$v_0 = \sqrt{\frac{gx}{\left(\mathrm{tg}\,\alpha - \frac{h}{x}\right) 2 \cos^2 \alpha}}$$

, wanneer α de hoek is waaronder het werptuig begint op te stijgen, *h* de hoogte waarop men het loslaat, *x* de dracht. Bepaal deze grootheden op het sportterrein uit enkele proeven; *h* mag ruw geschat worden, voor α kunnen we 30° aannemen. U kunt nu v_0 berekenen (zie het tabelletje!).

Als *h* klein is ten opzichte van *x* zoals bij het speerwerpen en nog meer bij slagbal, wordt de uitdrukking veel eenvoudiger:

$$v_0 = \sqrt{\frac{gx}{\sin(2\alpha)}} \text{ of bij benadering } v_0 = \sqrt{gx}.$$

h	***m***	***l***	***x***	***v_0***	**α**	***T***	***U***	**totale energie *T* × *U***	**totale energie ook voor arm-beweging**	
kogel	1,7 m	5 kg	1,4 m	8 m	15 m/sec	30°	38 kgm	3,5kgm	42 kgm	54 kgm
speer	1,8	0,5	1,75	35	21	30°	11	0,4	11	46
slagbal	1,8	0,1	2,35	66	28	30°	4	0,1	4	67

We berekenen ook de kinetische energie *T* en de potentiële energie *U* die aan het werptuig meegedeeld zijn. In de laatste kolom is aangegeven hoe groot de totale energie wordt, als men bedenkt dat de snelheid niet alleen aan het voorwerp, maar ook aan de massa van de arm wordt meegedeeld (*m* = 1,6 kg). De energieën worden dan van dezelfde orde van grootte voor deze zo verschillende soorten sport.

Bij gegeven beginsnelheid is de gunstigste hoek α voor het werpen gegeven door de uitdrukking

$$\cos(2\alpha) = \frac{2hg}{v_0^2}.$$

Hoe groter de beginsnelheid, hoe meer deze hoek nadert tot 45°, hij is echter altijd kleiner. Met de benaderde waarden die we voor *v* hebben gevonden, berekenen we nu de gunstigste hoeken: kogel, 37°; speer, 40°; slagbal, 41°.

Bij het schijfwerpen is de beweging zo eenvoudig en overzichtelijk, dat een mechanische schematisering zich zonder bezwaar laat uitvoeren. Degene die werpt draait om een vertikale as en zwaait de schijf, zijn lichaam trekt naar één kant, de schijf naar de andere kant; het lichaam is zwaarder en beschrijft slechts een kleine baan, de schijf is lichter en beschrijft een grote kring. Een zo grote middelpuntvliedende kracht wordt ontwikkeld, dat de vingers grote moeite hebben om de schijf vast te houden; op het juiste ogenblik laten ze los, en de schijf vliegt weg in de richting van de raaklijn. Uit de dracht, die 35 m kan bedragen, vinden we bij benadering de beginsnelheid $v_0 = \sqrt{gx} = \sqrt{10.35} = 19$ m/sec.

De middelpuntvliedende versnelling bedraagt dan $v^2/r = (19)^2/0{,}85 = 400$ m/sec^2, 40 maal meer dan de versnelling der zwaartekracht. De schijf, die slechts 2 kg weegt, oefent dus bij het zwaaien een kracht van 80 kg uit!

44. Springen.

Het ver-springen, *zonder aanloop*, gelijkt als mechanisch probleem in zekere mate op de worpbeweging. Ook hier zou het onjuist zijn, klakkeloos de eigenschappen der klassieke kogelbaan toe te passen, en als gunstigste stijghoek die van 45° aan te houden, want er zijn tal van complicerende omstandigheden. 1°. De beginsnelheid die we met alle inspanning onzer krachten aan het lichaam kunnen meedelen hangt af van de richting waarin gesprongen wordt. 2°. Vóór we van de springplank vrijkomen hebben we aan het lichaam reeds arbeidsvermogen moeten meedelen, en wel des te meer naarmate we in steilere richting springen. 3°. De armen zwaaien opwaarts, en helpen door hun traagheid om het lichaam mee te slepen. 4°. De afstand waarover gesprongen is wordt niet gemeten naar de verplaatsing van het zwaartepunt, dat de eigenlijke kogelbaan beschrijft, maar naar de afstand tussen de voeten bij het vertrek en bij het neerkomen. Deze laatste omstandigheid maakt dat het lichaam van den springer een draaiing moet uitvoeren, zodat hij voorover hellend de sprong begint, en achterover hellend neerkomt. Hij moet zich dus bij het afzetten een impuls geven, dat gericht is vóór zijn zwaartepunt langs (vgl. fig. 32), en de aldus verkregen draaiing moet hij versnellen door optrekken der benen en naar beneden brengen van de armen, zodat zijn traagheidsmoment kleiner wordt (§ 42).

Een sprong van 3 m geldt als zeer goed. Schat dat het zwaarte-

punt daarbij een horizontale afstand *l* = 2,50 m heeft afgelegd, en neem aan dat gesprongen is onder een hoek $\alpha = 45^\circ$. Uit de uitdrukking

$$l = \frac{v_0^2 \,.\, \sin 2\alpha}{g} \quad \text{volgt} \quad v_0^2 = \frac{10\,.\,2{,}5}{1} = 25 \quad \text{en} \quad v_0 = 5 \text{ m/sec.}$$

Het springen met aanloop geeft den springer een horizontale voorwaartse snelheid *h*, die zich samenstelt met de eigenlijke sprongsnelheid *s* tot een resultante *v*. Aangezien we bij het rennen snelheden halen kunnen van 10 m/sec, bij het springen zonder aanloop van 5 m/sec, is $h \approx 2s$; de snelheid van de aanloop is hier dus van grote betekenis. Al naar gelang van de richting waarin de springer zich afzet zal de resulterende snelheid v_0 verschillende waarden kunnen aannemen, en tegelijk zal de stijghoek α, waaronder de sprong begint, van waarde veranderen; men ziet hier dus zeer mooi hoe in de formule

$$l = \frac{v_0^2 \ \sin(2\alpha)}{g}$$

de grootheid *v* van α afhangt. Dit kan precies uitgerekend worden. Men vindt dat de grootste afstand bereikt wordt als de springer zich steil afzet onder een hoek van 68°; de combinatie met de horizontale snelheid maakt dat de baan dan feitelijk onder 22° opstijgt. - Dergelijke berekeningen hebben echter slechts beperkte geldigheid, omdat ze alleen toepasselijk zijn op vereenvoudigde modellen van de werkelijke lichaamsbeweging.

Nog veel ingewikkelder en moeilijker te schematiseren is het *hoogspringen met de polsstok*. Laten we vooreerst het lichaam als helemaal star denken. De voornaamste praktische vraag die de sportbeoefenaar stelt is die naar de gunstigste hoek α waaronder de polsstok bij 't begin van de sprong in de grond geprikt moet worden. Hierbij spelen twee overwegingen een rol. 1°. We grijpen de polsstok op een hoogte van ongeveer 2 m boven de grond, dus op $2/\sin\alpha$ meter van het uiteinde dat op de grond komt te staan; de springer kan zich dus ten hoogste verheffen over $2/\sin\alpha - 2$ meter. 2°. Dit zal echter slechts gelukken, indien de aanloopsnelheid *h* voldoende groot is. Loodrecht op de polsstok is de snelheidscomponente $h \sin\alpha$, plus nog de snelheid *s* waarmee de springer zich afzet; de vertikale componente van deze beginsnelheid is dus $v = \cos\alpha(h \sin\alpha + s)$; de hoogte die bereikt wordt laat zich dan eenvoudig berekenen als die van een opwaarts geworpen steen, zij wordt

$$\frac{v_0^2}{2g} = \frac{(h \sin \alpha + s)^2 \cos^2 \alpha}{2g}.$$

Is deze hoogte kleiner dan die, berekend naar onze eerste overweging (1°), dan lukt de sprong niet; is ze groter, dan houden we energie over. Het gunstigste geval is dat waarin precies

$$\frac{2}{\sin \alpha} - 2 = \frac{(h \sin \alpha + s)^2 \cos^2 \alpha}{2g}.$$

Voor h = 8 m/sec, s = 3, 5 m/sec, vindt men α = 30° ongeveer: de polsstok moet dus sterk hellend in de grond gezet worden, we moeten hem op 4 m van het uiteinde vastgrijpen.

In werkelijkheid zouden we nog het zwaaien van het lichaam in rekening moeten brengen, het zich optrekken met de armen, het intrekken der benen, enz.

45. Waarnemingen bij het zwemmen.

Het is bekend dat het gewicht van ons lichaam iets kleiner is dan dat van het verplaatste water; het overschot, waardoor we vanzelf drijven, is verschillend van mens tot mens. De opwaartse druk wordt groter als we inademen, kleiner als we uitademen; in zeewater is hij merkbaar groter dan in zoet water. Het gewicht van het lichaam kunnen we ons denken als één enkele kracht die in het zwaartepunt van het lichaam aangrijpt; de opwaartse druk grijpt aan in het zwaartepunt van het verplaatste water, het zogenaamde drukmiddelpunt. En aangezien dit drukmiddelpunt hoger ligt dan het zwaartepunt, zal het lichaam onder water zich rechtop instellen, voor zover dit niet belet wordt door de bewegingen van den duiker. Evenzo zullen bij het zwemmen de benen steeds neiging hebben tot dalen.

Om te bestuderen in hoeverre de verschillende bewegingen waaruit de zwemslag bestaat tot de voortbeweging bijdragen, hangt men den zwemmer aan de vaste hengel, en beoordeelt de helling die het hengeltouw aanneemt. Bij het onderzoek van de schoolslag bijvoorbeeld doet men de volgende waarnemingen. 1. Het achteruit bewegen der armen veroorzaakt slechts een geringe voorwaartse stuwing. 2. Het intrekken van armen en benen veroorzaakt een geringe *achterwaartse* stuwing. 3. Het uitstrekken en naar elkaar toe brengen der benen veroorzaakt een sterke voorwaartse stuwing, die in hoofdzaak de voortbeweging van den zwemmer bepaalt.

46. De mechanica van het schoonspringen.[1)]

Zeer interessant zijn de bewegingen van den springer, tussen het ogenblik waarop hij de springplank verlaat, en dat waarop hij in het water terechtkomt. We maken hier kennis met de mechanica van een geheel aan zichzelf overgelaten lichaam, waarop alleen de zwaartekracht werkt, terwijl het zich verder los van elke dwang kan instellen. De kunst is, in de korte ogenblikken die voor de waarneming beschikbaar zijn, met de nodige geestelijke concentratie precies de proef uit te voeren zoals men ze bedoeld had, en het resultaat daarvan op te merken!

1. Zodra men de springplank verlaten heeft, beschrijft het zwaartepunt van het lichaam (in de buikstreek gelegen) een parabool, de klassieke 'kogelbaan'. Geen spierbewegingen van den springer, hoe heftig of hoe ingewikkeld ook, kunnen daar iets aan veranderen. We kunnen dus onmiddellijk berekenen hoe lang de sprong duurt en met welk een vaart de springer op het water neerkomt:

van de 1 m-plank, niet omhoogspringend	0,45 sec,	15 km/uur
van de 3 m-plank, omhoogspringend met aanloop	0,90 sec,	30 km/uur
van de 10 m-toren	1,40 sec,	50 km/uur

   De eindsnelheden zijn dus vergelijkbaar met die van een fietser, van een tram, van een ouderwetse trein.

2. Steek tijdens het springen plotseling een arm zijwaarts uit. U merkt duidelijk dat het lichaam zich een weinig in de tegengestelde richting verplaatst. Dit volgt vanzelf uit het beginsel der constante baan van het zwaartepunt.

3. Zeer belangrijk is de wet van het behoud van impulsmoment: bij rotatie om een draaiingsas kan men de som *mvr* opmaken, uitgestrekt over alle deeltjes waaruit het lichaam bestaat (*m* = massa, *v* = rotatiesnelheid, *r* = afstand tot de as). De stelling is nu, dat deze som - 'de hoeveelheid draaiing', zou men kunnen zeggen - een onveranderlijke waarde behoudt, zolang er geen koppels van krachten op het lichaam werken. In § 42 leerden we dezelfde wet reeds kennen, maar anders geformuleerd; immers $\Sigma\, mvr = \Sigma\, mr^2 .\ v/r = \omega .\ \Sigma mr^2$ = hoeksnelheid × traagheidsmoment, welk produkt dus ook onveranderlijk moet blijven. De proeven die we nu zullen beschrijven geven vanzelf

1) D.J. Gerritsen, de Zwemkroniek, **15**, 1938 (blz. 287, 295, 302, 310).

een denkbeeld van de betekenis dezer zeer algemene en belangrijke wet.
Daaruit volgt bijvoorbeeld, dat een rugwaartse of borstwaartse draaiing onmogelijk ingezet kan worden als de springplank eenmaal verlaten is. Dat er dikwijls door sportmensen aan de juistheid dezer bewering getwijfeld wordt, is te verklaren door de moeilijkheid *precies waar te nemen wat er gebeurt* en *onbewuste draaiimpulsen bij het verlaten van de plank te vermijden*.
De draaiingen ontstaan telkens, als het impuls bij het afzetten in een richting werkt die niet door het zwaartepunt van het lichaam gaat: het algemene beginsel, dat we reeds herhaaldelijk hebben leren kennen (§ 44). Hoe sterker men op dat ogenblik vóórover of

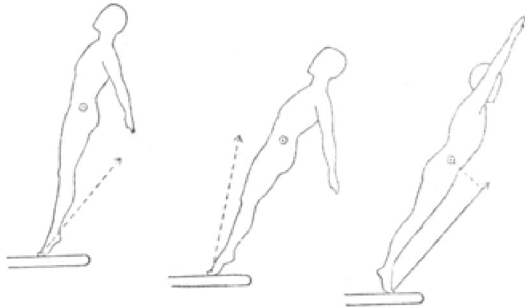


Fig. 32. Het teweegbrengen van draaiingen bij het springen. Naar H. Schuppe, Physik der Leibesübungen, blz. 197 (Stuttgart 1941).

achterover helt, des te groter de lengte van de loodlijn, neergelaten van het zwaartepunt op de afzetrichting: des te groter dus het werkende koppel en dus ook het impulsmoment (fig. 32).

4. Beproef tijdens de sprong de romp naar voren te buigen. Onmiddellijk blijkt, dat dit alleen mogelijk is wanneer de benen tegelijk de tegengestelde draaiing maken en de romp tegemoet komen.

5. Tracht tijdens de sprong hoofd en schouders achteruit te werpen: automatisch gaan de benen ook naar achteren (‘hol trekken’). Dergelijke bewegingen en die van vorige alinea kunnen dus nooit helpen om u over de kop te doen slaan en een salto uit te voeren.

6. Hef vóór het springen de handen boven het hoofd, en zwaai ze vóór u uit en neerwaarts tijdens de sprong: de rest van het lichaam draait in tegengestelde zin. Men kan aldus een sprong corrigeren en beter vertikaal in 't water terechtkomen.

7. Hoe dichter men de massa van het lichaam bij het zwaartepunt brengt, hoe sneller de wenteling moet worden (behoud van $\Sigma\ mvr$!). Als men zich dus bij het afzetten een voorwaartse of achterwaartse draaiing heeft gegeven, kan men die draaiing versnellen: *a*) door de armen aan te sluiten, door hol trekken, door het hoofd te buigen; *b*) veel effektiever, door over te gaan van de zweefhouding naar de hoekhouding, nog beter naar de hurkhouding; *c*) door bij hurkhouding het hoofd op de knieën te drukken of de benen nog dieper te vouwen.

8. Voor 'schroefsprongen', waarbij men om de lengte-as van het lichaam draait, gelden dezelfde beginselen die we bij draaiingen om de dwarse as hebben leren kennen. Ook hier is het niet mogelijk de draaiing te beginnen als men zich eenmaal in de lucht bevindt: daarom is het geheel onjuist en misleidend, dat het wedstrijdreglement verbiedt, schroefsprongen 'van de plank af te draaien'. - Een eenmaal begonnen draaiing om de lengteas kan versneld worden, als men in zweefhouding springt, door de armen boven het hoofd te brengen of aan te sluiten; springt men in hoekhouding, dan kan men tot de gestrekte houding overgaan; het wegnemen van de holle rug geeft insgelijks een kleine versnelling.

47. De veerkracht van een gummibal.[1)]

Laat de bal van een hoogte van 2,50 m op een harde grond vallen, en bepaal tot welke hoogte hij opspringt.

Hieruit is nu onmiddellijk de 'sprongcoëfficiënt' *k* te berekenen, d.i. de verhouding van de *snelheid* waarmee hij opspringt tot de *snelheid* waarmee hij viel (Volgens de wetten der onvolkomen veerkrachtige botsing is deze verhouding een vast getal). Immers is de snelheid waarmee de bal van de hoogte h_1 neerkomt: $v_1 = \sqrt{2gh_1}$; de snelheid waarmee hij weer opstijgt: $v_2 = kv_1$; de hoogte h_2 tot waar hij stijgt is weer bepaald door

$v_2 = \sqrt{2gh_2}$. Dus $k = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}$.

Bij een goede tennisbal ligt *k* tussen 0,71 en 0,78 (bij 20° C).

Bepaal ook de hoogte tot dewelke de bal de 2e, 3e, 4e .... maal opspringt, en vergelijk met de berekening.
Bepaal de hoogte tot waar een bal opspringt bij verschillende temperaturen. Is er een grafische voorstelling te maken van *k* als functie van *t*?

In hoeveel tijd komt een bal tot rust, *die men van een hoogte* h_1 = 2,50 *m laat vallen*? - Is dat vraagstuk wel oplosbaar? Is het soms

1) E. Lampe, Mathematik und Sport (Teubner 1929), blz. 40.

niet zó, dat de hoogte tot dewelke de bal opspringt wel kleiner en kleiner en kleiner wordt, maar theoretisch nooit helemaal nul? Wordt de tijd dan niet (theoretisch) oneindig groot? - Deze vragen kunnen alleen met een beetje wiskunde beantwoord worden.

De tijd voor het eerste vallen is

$$t_1 = \sqrt{\frac{2h_1}{g_1}}$$

; nadat de bal weer opgesprongen is, is de tijdsduur voor het tweede vallen:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2h_2}{g}} = kt_1$$

. Bedenkt men dat de bal de eerste maal alleen daalt, terwijl hij alle volgende malen eerst stijgt en dan daalt, dan vindt men dat hij tot rust komt na een tijd T = t_1 = 2t_2 + 2t_3 + ... = t_1 + 2kt_1 (1 + k + k^2 + ...) =

$$= t_1 + 2kt_1\frac{1}{1-k} = t_1\frac{1+k}{1-k} = \sqrt{\frac{2h_1}{g}} \cdot \frac{1+k}{1-k}.$$

Voor k = 0.70 is T = 4,0 sec.

Het merkwaardige is dus, dat de bal wel een oneindig aantal keren op en neer springt, - want na elke sprong komt er een die ongeveer half zo hoog als de vorige is -; maar dat de opeenvolgende sprongen minder en minder lang duren (wat men hoort als men de proef neemt), en dat de totale duur van dit oneindige aantal sprongen toch een heel bescheiden tijd is van slechts 4 sekunden! - Bepaal proefondervindelijk zo nauwkeurig mogelijk de tijd die de bal nodig heeft om tot rust te komen, en vergelijk met de berekening!

Intussen is dit alles niet veel anders dan .... wiskunde. De natuur is veel ingewikkelder. Bij de laatste sprongen komt de beweging in resonantie met de elastische trillingen in het balletje zelf, zodat de duur der sprongen *constant* wordt!

Merkwaardig is de vorm van het kuiltje, door de bal gevormd, als hij in zeer los zand terecht komt. Er mag geen wind zijn; de bal waarmee ik experimenteerde had een middellijn van 15 cm, de vorm van het kuiltje werd des te gecompliceerder naarmate de bal van hoger viel.

48. De baan van een golfbal.[1)]

De golfbal bestaat uit guttapercha, weegt ongeveer 40 g, en heeft een middellijn van 4,3 cm. Waarnemingen over de baan dienen zoveel mogelijk te geschieden *bij zeer windstil weder*,

1) P.G. Tait, Trans. R. Soc. Edinburgh, **37**, 427, 1893 en 1898, alsook verschillende stukken van denzelfden schrijver in Nature (1887, 1890, 1891, 1893). De berekeningen zouden te wijzigen zijn naar aanleiding van de moderne metingen over de weerstand van bollen. Vgl. ook J.J. Thomson, Nat. **85**, 251, 1910.

omdat de bal zo licht is en over zulke grote afstanden vliegt dat de luchtstromen er een grote invloed op hebben.

Het merkwaardigst zijn de kromme banen die een golfbal aflegt als hij zó getroffen wordt dat hij behalve zijn voortgaande beweging ook nog snel om een vertikale as draait als een tol. Dit is het geval als het eindvlak van de 'club' niet loodrecht op de bewegingsrichting staat, maar schuin, zodat het door de wrijving op het ogenblik van de slag de omtrek van de bal enigszins meesleept. Op een afstand van 150 m kan de bal soms 30 m of meer afwijken, en dikwijls is zijn bewegingsrichting op het ogenblik dat hij neerkomt 90° gedraaid ten opzichte van de oorspronkelijke!

Als men toevallig zulk een scheef getroffen golfbal op de grond ziet neerkomen, kan men dikwijls opmerken dat hij nog snel om zijn as draait: een bewijs dat deze aswenteling gedurende het afleggen van de baan voortdurend gewerkt heeft, en waarschijnlijk slechts weinig gedempt wordt door de voortgaande beweging.

Nog in een ander geval heeft de aswenteling van een golfbal merkbare invloed op de baan die hij aflegt; dat is wanneer de bal iets onder het midden wordt getroffen, zoals dat het geval is bij een lange slag: 'a long drive'. Om zulk een baan te bestuderen, moeten we liefst met verschillende waarnemers tegelijk een uitstekend speler bekijken, en alles optekenen wat er op te merken valt. Wij sommen op wat men moet schatten, en geven tussen haakjes gemiddelde waarden bij wijze van voorbeeld.

1. Hoek α waaronder de bal opstijgt (13_5^{o}).
2. Dracht (180 m).
3. Duur van de baan (6 sec).
4. Afstand afgelegd in de eerste sekunde (80 m).
5. Maximale hoogte van de baan (21 m).
6. $\frac{\text{Afstand waarop dit maximum bereikt wordt}}{\text{Totale dracht}}$ (0,73).
7. Helling bij het neerkomen (38°).

De 4 eerste waarnemingen zijn de belangrijkste. Hoed u voor het overschatten der opstijgingshoeken! Houd een stok in de richting van de waargenomen helling, en meet daaraan de hoek met een meetlat (uit de tangens). De afstand afgelegd in de eerste sekunde vinden we door verscheiden waarnemers op korte afstand van elkaar te posteren in de buurt van het punt waar we verwachten dat de bal na 1 sekunde aankomen zal.

Beschouw eerst eens de bal als een punt dat beweegt met een wrijving evenredig met het kwadraat van zijn snelheid, en verwaarloos voorlopig de invloed

der zwaartekracht: $dv/dt = v^2/b$. Uit andere proeven over de weerstand van bollen volgt dat b ongeveer 90 m is, wanneer v in m/sec wordt uitgedrukt. Door eenvoudige integratie volgt:

$$(1) \quad \ldots . v = \frac{V}{1 + \frac{Vt}{b}}$$

waarin V de beginsnelheid betekent.

De afgelegde weg wordt
(2) ....$x = b \log(1 + Vt/b)$.

Aangezien onze 4e waarneming $x = 80$ leverde voor $t = 1$, volgt $V = 129$ m. *De snelheid van een golfbal is aanvankelijk 5 maal zo groot als die van een sneltrein, ze is meer dan een derde van de geluidssnelheid*!

Wordt nu de werking van de zwaartekracht in rekening gebracht, dan vindt men voor banen met kleine opstijgingshoek α de vergelijking:

$$(3) \quad \ldots . y = \left(tg\, \alpha + \frac{gb}{2V^2}\right) x - \frac{gb^2}{4V^2}\left(e^{\frac{2x}{b}} - 1\right).$$

Uit de opstijgingshoek α en de reeds geschatte waarde der aanvangsnelheid kan men met formule (3) alle andere gegevens berekenen die we eerst proefondervindelijk hadden geschat. Men vindt dan een heel aardige overeenstemming op bijna alle punten; mocht dat met uw gegevens niet bevredigend zijn, dan is het waarschijnlijk voldoende de beginsnelheid iets te wijzigen om de vereiste overeenstemming te verkrijgen. Met de hoger aangenomen getallen vindt men: dracht 160 m; maximale hoogte 17 m;

$$\frac{\text{afstand van 't maximum}}{\text{totale dracht}} = 0{,}64.$$

En toch is deze overeenstemming slechts een schijnbare! Want als we de duur van de baan berekenen, - gebruik makend van de eenvoudige vergelijking (2) die voor dit doel voldoende benaderd is -, vinden we slechts 3,4 sec in plaats van de 6 sec der waarneming. Deze éne tegenstrijdigheid is zo duidelijk en overtuigend, dat de overige mooie overeenstemmingen ons niet kunnen bevredigen. *De bal blijft veel langer in de lucht dan verwacht kon worden* volgens onze eenvoudige theorie; er moet nog een andere kracht werken dan die welke we beschouwd hebben. Van belang is ook dat de verhouding 0,64 merkbaar kleiner is dan de waargenomen 0,73: *de werkelijke baan is merkbaar sterker asymmetrisch dan de berekende*.

De verklaring van deze verschijnselen is nu juist te vinden in de aswenteling van de bal, die bij zulk een soort slag in de regel onder het midden wordt geraakt, snel gaat wentelen om een

horizontale as loodrecht op de bewegingsrichting, en stelselmatig neiging tot stijgen gaat vertonen. Deze neiging is het grootst bij het begin van de baan, omdat daar de voortgaande beweging het snelst is. Dikwijls wordt de baan zelfs hol naar boven over de gehele eerste helft harer lengte, en in enkele gevallen is dit rechtstreeks waarneembaar. Het spreekt vanzelf dat de dracht door dit verschijnsel aanzienlijk vergroot wordt. Het effekt is bij golf sterker dan bij de meeste andere balspelen, omdat de ballen betrekkelijk licht zijn, de snelheden en de duur van een worp zeer groot. In volgende paragraaf zal nog nader op de verklaring worden ingegaan.

49. Kromme banen bij tennis en andere spelen.

> *Toen herinnerde ik mij*, *dat ik dikwijls een tennisbal zulk een kromme baan had zien volgen*, *als hij met een schuin gehouden racket geslagen werd*. *Want*. *aangezien hij zowel een draaiende als een voortgaande beweging krijgt, moet hij de lucht om zich heen sterker samenpersen aan de zijde waar de bewegingen elkaar versterken, dan aan de andere zijde*.
> *I. Newton*, *brief aan Oldenburg* 1671-72.
> (*Uitg. Horsley*, **4**. 297).

Bij allerlei balspelen kan de bal een snelle draaiing om zijn as krijgen, als de slag aankomt in een richting die niet door het middelpunt gaat; het impuls van de slag en de traagheidsreactie van dat middelpunt (= zwaartepunt) veroorzaken dan een koppel, dat de bal aan het draaien brengt. De voetbal- of vuistbalspeler verkrijgt dit effekt, door de nauwkeurige keuze van het punt waar hij de bal raakt; bij tennis of hockey is het voldoende, het slagtuig schuin op de slagrichting te houden; bij handbal, waterpolo, schijfwerpen, brengt de speler met een snelle handbeweging de rotatie teweeg, net vóór hij de bal of de schijf loslaat.

Het merkwaardige is nu, dat dergelijke sneldraaiende ballen een baan beschrijven, die geheel abnormale krommingen vertoont. Ze wijken altijd af in de richting naar dewelke hun voorste punt wentelt: ‘de bal loopt zijn neus achterna’. Een te laag getroffen rugby-bal bijvoorbeeld draait aan de vóórzijde opwaarts, en beschrijft een baan die dikwijls opwaarts gekromd is. De tennisspeler geeft aan zijn bal bij voorkeur de tegenovergestelde draaiing; hij kan hem dan met grote snelheid wegslaan, en toch bereiken dat de bal spoedig naar beneden komt en nog binnen de vereiste afstand achter het net stuit. Evenzo kunnen afwijkingen naar

rechts of links optreden, die nog gemakkelijker te onderscheiden zijn. - Tracht dergelijke effekten te bereiken; schat het bedrag der afwijking! De verklaring ligt in het feit, dat de bal in zijn aswenteling de lucht om zich heen enigszins meeneemt (fig. 33); aan de ene zijde A beweegt die lucht tegengesteld aan de algemene luchtstroom, die de bal tegemoet waait, aan de andere zijde B in dezelfde richting. Bij A zal daarom de drukking groter worden dan bij B, en hierdoor zal de bal zijdelings afwijken, juist in de richting die we hebben waargenomen. Deze merkwaardige aerodynamische werking is niets anders dan het beroemde Magnus-effekt, waarop de bouw der rotor-schepen van Flettner berust.

Een andere eigenaardigheid vertonen de draaiballen als ze stuiten en teruggekaatst worden. In het korte ogenblik van de



Fig. 33. De kromme baan van een sneldraaiende golfbal.

aanraking met de grond krijgt er de bal tengevolge van zijn draaiing een horizontale snelheidscomponente bij. Hij springt dan soms in de meest onverwachte richtingen terug, precies zoals de ‘effektballen’ bij het biljartspel; in sommige gevallen keert hij zelfs terug naar wie hem weggeslagen heeft!

50. Kiskassen.

Snel draaiende voorwerpen vertonen een wonderlijke stabiliteit, waardoor ze zich schijnbaar heel gek gedragen! Zolang ze maar snel genoeg draaien houden ze hun stand in de ruimte onveranderd, vallen dus ook niet om, waar een gewoon voorwerp dat wel zou doen. Het is dezelfde eigenschap der *traagheid*, die bij de slinger (ook een draaiend voorwerp!) al zorgde voor het bewaren van het slingervak, en welke wij hier in verhoogde mate tot uiting zien komen.

De diabolo blijft in evenwicht op een touw hangen, en valt in dezelfde stand naar beneden waarin hij omhooggeworpen was. De weggeworpen schijf beschrijft een kromme baan, maar haar vlak behoudt voortdurend dezelfde helling ten opzichte van de horizon.

Platte keien of oesterschelpen die men zó werpt dat ze een rustig wateroppervlak onder een heel kleine hoek treffen, nadat men hun bij 't werpen een snelle draaibeweging heeft gegeven,

weerkaatsen[1] tegen het wateroppervlak maar bewaren hun stand; ze kunnen zelfs verscheiden malen achtereenvolgens het water raken, telkens intussen verder 'zeilend' (wel 10 maal!). Voor de bestudering van dit verschijnsel is het van belang goede foto's te maken, en de vorm van de kurve te onderzoeken die op een bepaald ogenblik alle gevormde golfjeskringen omhult.[2]

Zeer typisch is het zich geleidelijk oprichten, dat men af en toe bij een geworpen zeilsteen kan waarnemen. Is dit te wijten aan onvoldoend snelle draaiing? Of veeleer daaraan, dat de bewegingsrichting toevallig een vrij grote hoek met het draaiingsvlak vormt, zodat de luchtweerstand een

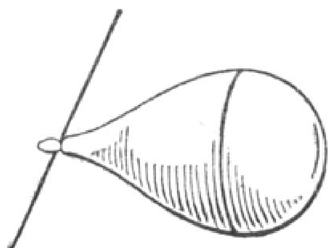


Fig. 34. Een sneldraaiende priktol, in horizontale stand op een touw rustend zonder te vallen!

koppel op de zeilsteen uitoefent (§ 78)?

51. De tol.

De drijftol en de priktol vertonen de gyroskopische verschijnselen het mooist[3]. Een rustende tol valt om, een draaiende tol blijft staan. De zwaartekracht heeft echter het gevolg dat hij een *precessiebeweging* gaat uitvoeren: zo noemt men het langzaam omlopen van de zacht hellende as, die een kegelmantel beschrijft.

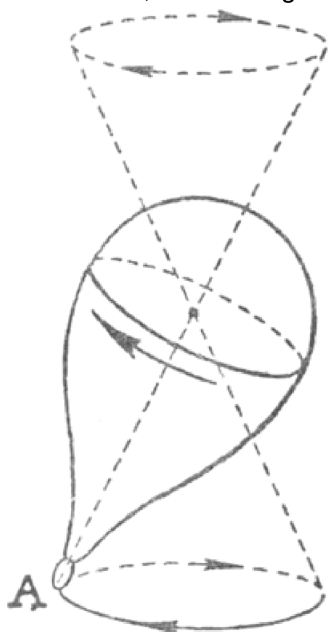


Fig. 35. Precessiebeweging van een tol.

Merk op dat de precessiebeweging bij een tol *in dezelfde zin* gebeurt als de aswenteling (fig. 35); dat hangt onmiddellijk samen met het feit, dat de tol gesteund wordt *onder* zijn

1) Dit is natuurlijk een andere soort terugkaatsing dan een gewone botsing. De hydrodynamische theorie van het verschijnsel is nog niet ontwikkeld.
2) Zs. math. naturw. Unterr. **66**, 383, 1935.
3) J. Perry: Spinning Tops. London, 1901.

zwaartepunt, dus in rust labiel zou zijn. Als men een tol maakt die boven zijn zwaartepunt gesteund wordt, zijn de draaiingsrichtingen tegengesteld.

Een priktol of drijftol die flink aan het draaien gebracht is vertoont eerst een duidelijke precessie; maar de helling der as wordt geringer, de tol gaat meer en meer rechtop staan, tot hij helemaal vertikaal staat en ‘zingt’. Langzamerhand echter ziet men de precessie opnieuw duidelijker en geleidelijk sneller

worden, de tol helt meer en meer; nu bemerkt men dat de as nog een derde soort beweging uitvoert, kleine schommelingetjes om de grote precessiebeweging, die heftiger worden naarmate de tol langzamer draait; eindelijk valt hij om. - Klaarblijkelijk is dit laatste het gevolg van de wrijving, die de draaiing van de tol remt en hem tenslotte tot stilstand brengt. Maar hoe moeten we het eerste gedeelte van het proces begrijpen, het zich oprichten van de as? - ‘Ik vraag mij af of een der lezers de verklaring hiervoor kan vinden; een knap wiskundige onder hen zal u zeggen dat de verklaring stellig ergens te vinden is in het mechanica-leerboek van Routh, of dat hij in elk geval iemand aan de universiteit kent die het zeker weet, en dat hij denkt dat hij het zelf ook wel geweten heeft, alhoewel hij nu de ingewikkelde wiskundige redeneringen vergeten heeft waarop hij eenmaal zijn scherpzinnigheid oefende.’[1)]

De verklaring staat echter in geen van de klassieke werken, en die welke Perry gemeend heeft te kunnen geven, houdt geen steek. Pas zeer onlangs werd de oplossing gevonden[2)], een bewijs dat er uit zulk een alledaags verschijnsel toch steeds nieuwe lering te halen valt. - Het is nml. bekend, dat de precessiebeweging van de tol in werkelijkheid gecompliceerd wordt door kleine knikbewegingetjes die de as om haar gemiddelde stand uitvoert, de zogenaamde *nutaties*. Zodra wij de tol op de grond zetten, begint hij een eindje te vallen; door zijn traagheid valt hij verder dan de helling die met de normale precessie-beweging zou overeenkomen. Daardoor krijgt de zwaartekracht een grotere componente, en treedt er dus een extra-krachtenkoppel op, dat er naar streeft de tol naar beneden te drukken, maar waaraan hij ontsnapt door zijdelings uit te wijken en zich daarna weer op te richten. Weer is het zijn traagheid die hem iets over de gemiddelde precessiestand heen haalt, en in deze steilste stand werkt ditmaal, vergeleken met de gemiddelde precessietoestand, een oprichtend krachtenkoppel, dat ook weer door zijdelings uitwijken beantwoord wordt. Zolang de tol op een wiskundig scherpe spits draait, is het oprichtende extrakoppel bij de steile stand even groot als het neerdrukkende extrakoppel bij de diepste stand.

Maar als de punt van de tol stomp is, komt er een detail in de nutatiebeweging dat voor ons doel van belang is. Let eens

1) Vrij naar Perry, t.a.p. blz. 67.
2) A.D. Fokker: Hoepels en tollen (Arch. Mus. Teyler, Ser. III, **9**, 343, 1941). Hier is getracht deze verklaring in eenvoudige woorden weer te geven, natuurlijk buiten verantwoordelijkheid van Prof. Fokker.

op de afstand tussen de twee aangrijpingspunten: het zwaartepunt *Z*, waar de zwaartekracht aangrijpt; en het contactpunt *C* met de vloer, waar de reaktie van deze vloer tegen drukt. De afstand *CZ* tussen die twee punten wordt een weinig groter als de tol meer rechtop gaat staan. Maar juist in deze phase der beweging zijn de oprichtende extra-krachten aan het werk: het oprichtende koppel is dus altijd een weinig groter dan het neerdrukkende, *gemiddeld richt de tol zich op*. De potentiële energie die de tol daarbij wint, ontleent hij aan de kinetische energie der nutaties, die geleidelijk uitsterven. - Het effekt neemt toe evenredig met de kromtestraal van de tolteen. Iedere jongen weet immers ook dat dit oprichten beter gaat met een tol die een stompe ‘appelpunt’ heeft, dan met een slankere ‘perepunt’; ook dat is ons nu begrijpelijk.

Aan de snelheid der precessiebeweging kunnen we zien hoeveel maal per sekunde de tol om zijn as draait. Stel *T* = duur van de precessie-omwenteling, *t* = duur van de aswenteling; dan is

$$T = \frac{4\pi^2\varrho^2}{ght}.$$

Hierin is *h* = afstand van het zwaartepunt tot de spits; *g* = versnelling van de zwaartekracht; ϱ = ‘traagheidsstraal’ (als

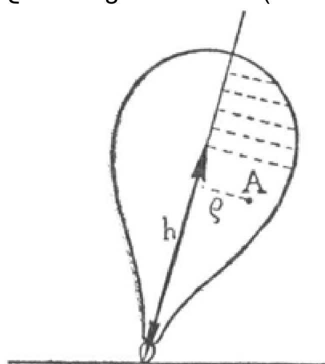


Fig. 36.

de afstand van een deeltje A tot de as voorgesteld wordt door *r*, is ϱ^2 het gemiddelde der waarden van r^2 voor alle deeltjes) (fig. 36).

Men ziet dat bij een onzer gewone tollen de waarden dezer grootheden van de volgende orde zijn: *h* = 5 cm; *g* = 981 cm/sec^2; ϱ = 2. Dan wordt *T* = 0,032/*t* of 1/*t* = 30*T*. Als dus de tol zijn precessiebeweging in 1 sekunde uitvoert, is dit een teken dat hij 30 maal per sekunde om zijn as draait. Een langzamer precessie wijst op nog meer omwentelingen.

Bekijk eens van dit standpunt de drijf- en priktollen van de jongens op straat, en vraag u af of dergelijke snelheden aannemelijk zijn.

> Het aantal omwentelingen is te schatten, door een witte krijtstreep straalsgewijs op de tol te trekken en hem 's avonds bij het licht van een (op wisselstroom brandende) gloeilamp te bekijken; aanvankelijk ziet men niets, maar

weldra bemerkt men een ster met drie stralen die een ogenblik stilstaat; iets later zijn het er 4, dan 5, enz. Aangezien een gloeilamp op wisselstroom flikkert met een periode van 0.01 sekunde, betekent uw waarneming dat de omwenteltijd van de tol eerst wellicht van de orde van 0,01 sekunde was en dan verlangzaamde tot 0,03, 0,04, 0,05. ... sec. - Nog mooier slaagt de waarneming bij verlichting met natriumlampen.

Zoek in het grint een keitje dat er min of meer eivormig uitziet,

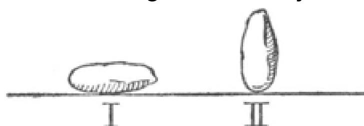


Fig. 37. Een langwerpig keitje (I) richt zich op wanneer men het snel aan het draaien brengt (II).

en doe het tussen beide duimen en wijsvingers op een goed effen tegelvloer *zo snel mogelijk* om zijn korte as draaien. Het steentje tolt een ogenblik om die as (fig. 37 **I**), maar kantelt weldra, en als het snel genoeg draait richt het zich helemaal op en wentelt nu om de lange as (**II**). Als men omgekeerd de kei eerst om de lange as laat tollen, ziet men de beweging niet veranderen. - Dit eigenaardige verschijnsel werd het eerst ontdekt door W. Thomson en Blackburn tijdens een vakantie, aan het strand doorgebracht, waar ze veel geschikte

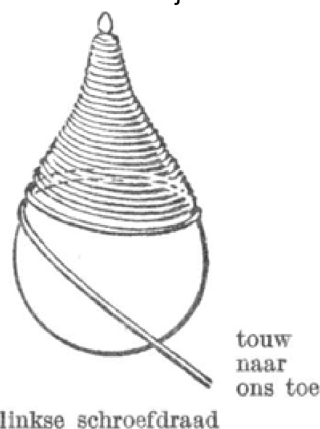


Fig. 38. Het uitgooien van een priktol met een *kort* touw.

keien vonden. De verklaring is waarschijnlijk dezelfde als van de zich oprichtende tol.

Eind September vindt u onder de eikebomen tal van eikeltjes die uit hun napje losgekomen zijn; schop tegen het uiteinde van een eikeltje zodat het snel om zijn as gaat rollen op het gladde asfalt van de weg; tot uw verrassing zult u zien dat het zich ineens rechtop op zijn punt te draaien stelt! Dit gaat veel gemakkelijker dan de proef met het keitje.

Over *het werpen van de priktol* zijn leuke waarnemingen en proeven gedaan[1)]; maar ik moet bekennen dat ik er niet goed in geslaagd ben die na te bootsen: ik vrees dat ik op het gebied van het priktollen geen deskundige meer ben! - Bij het werpen gebeuren er twee dingen: 1. de tol wordt aan het draaien gebracht; 2. tegen dat het touw bijna afgerold is, wordt er een koppel op die gyrostaat uitgeoefend. Hiermee rekening houdend, kan men een tamelijk *kort* touw gebruiken, dit opwinden op de wijze van een *linkse* schroefdraad (fig. 38), de tol *met*

1) A. Taber Jones, Science, **64**, 254, 1926.

de punt naar boven houden, en met de *rechterhand* uitwerpen; door de werking van het koppel keert de tol zich dan onderste boven en komt in de normale stand op de grond. Gebruikt men een *lang* touw, dan is de draaibeweging al te groot vóór het koppel gaat werken; in dit geval werpt men dus met *de punt benedenwaarts* gericht; de kunst is om goed horizontaal uit te gooien, en op dat ogenblik geen draaiingsmoment aan de tol mee te delen.

52. Gyrostatische werkingen bij een vliegtuig.

De typische bewegingseigenaardigheden van de tol vinden we in allerlei vormen terug bij snel draaiende voorwerpen. Bij het vliegtuig worden ze veroorzaakt door de snelle wenteling van de schroef. Deze draait in dezelfde zin als de wijzers van een uurwerk, gezien van de zijde waar de piloot zit. Bij elke bocht naar rechts nu, vertoont het vliegtuig neiging om te dalen; bij elke bocht naar links, om te stijgen. Elke opwaartse bocht (= toeneming van de stijging) veroorzaakt tevens een afwijking naar rechts; elke neerwaartse bocht, een afwijking naar links. Dit is precies wat we moeten verwachten volgens de wet der gyrostatische beweging, die we op blz. 52 leerden kennen. Hoewel de schroef snel draait, zijn de effekten slechts gering, daar de schroef de massa van het gehele vliegtuig in beweging moet brengen. Bij de oudere vliegtuigtypen veroorzaakten de draaiende delen der motoren veel sterkere effekten; thans is het alleen nog maar de schroef die een merkbaar draaimoment teweegbrengt.

53. De hoepel.[1)]

De bewegingswetten van de hoepel vertonen een grote gelijkenis met die van de tol: ook hier dat merkwaardige vermogen om niet te vallen, zodra de wenteling voldoende snel geschiedt. Een principiëel verschil is, dat de tol bij benadering op één punt steunt; terwijl de hoepel langs een cirkel loopt, in het midden waarvan zich het zwaartepunt bevindt. - In plaats van de ingewikkelde vergelijkingen van de hoepelbeweging neer te schrijven en hun oplossing te bespreken, willen we liever een opsomming geven van de voornaamste bewegingsvormen die een hoepel kan vertonen, u uitnodigend die één voor één te verwezenlijken

1) A.D. Fokker: Hoepels en tollen (Arch. Mus. Teyler, Ser. III, **9**, 43, 1941).

en hun fraaie verscheidenheid te bewonderen. Dikwijls zal dit niet ineens gelukken, u zult een aantal keren moeten beproeven, en afwachten wat het toeval brengt. Belangrijk voor de beoordeling van de verkregen beweging is het spoor dat de hoepel op de grond getekend heeft, bijvoorbeeld op het effen, vochtige strand (fig. 39).

1. *Rollen*: de hoepel loopt rechtop en wentelt om een horizontale as loodrecht op zijn vlak; zijn zwaartepunt beschrijft

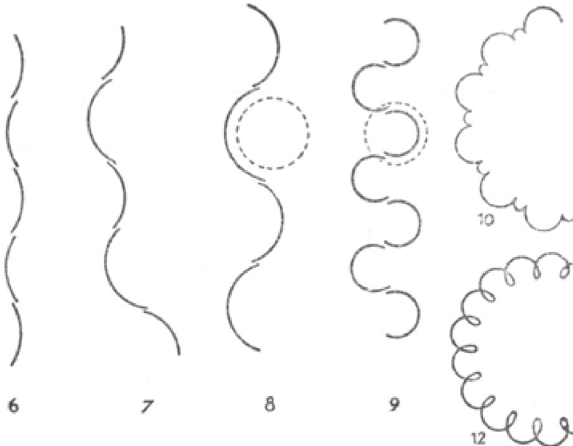


Fig. 39. Enkele bewegingsvormen van de hoepel: karakteristieke sporen op de grond. (Naar Fokker, t.a. pl.; iets geschematiseerd.)

een horizontale rechte lijn, de beweging is eenparig. Of de rollende beweging stabiel is, hangt van de snelheid van de hoepel af; laat een hoepel met straal *r* langs een hellende plank naar beneden rollen, variëer de helling en wijzig aldus de eindsnelheid die de hoepel krijgt. Zolang hij van een hoogte $< r/4$ daalt, is de beweging labiel en de hoepel valt aan de voet van de helling om; is de hoogte $> r/4$, dan is de beweging stabiel.

2. *Tollen*: de hoepel staat rechtop, hij wentelt om de vertikale diameter die door zijn steunpunt gaat; het zwaartepunt blijft onbewegelijk, de beweging is eenparig.

3. *Kantelen*: stel de hoepel eerst rechtop, en laat hem nu omvallen, d.i. wentelen om de horizontale raaklijn door zijn steunpunt in de vloer; deze beweging is versneld.

4. *Eenparig kringrollen*: rollen, waaraan een weinig tollen wordt toegevoegd; de hoepel loopt langs een grote kring op de vloer; hoe sneller hij rolt, des te schever stelt hij zich in. Merk op dat we hier een typische precessiebeweging hebben, vergelijkbaar met die van de tol: het koppel, uitgeoefend door de zwaartekracht en de weerstand in het vloersteunpunt, streeft ernaar de hoepel te kantelen om een horizontale as; als het echter inwerkt op de draaiing van de hoepel zelf, krijgen we als resultaat, dat het vlak van de hoepel om een vertikale as gaat draaien.

5. *Eenparig kringtollen*: tollen, waaraan een weinig rollen wordt toegevoegd. Het zwaartepunt blijft op zijn plaats, maar het ligt nu iets dichter bij de vloer dan de straal van de hoepel. De hoepel helt dus een weinig; hij draait op elk ogenblik om de middellijn door het vloersteunpunt, maar die middellijn gaat telkens door een ander punt van de hoepel. Het vloersteunpunt beschrijft een cirkeltje. - Dit is de beweging die zich meestal instelt als men de hoepel doet tollen en hem dan zonder voorzorgen vrijlaat.
   Een zeer kenmerkende overgangsvorm tussen kringrollen en kringtollen ziet men dikwijls als de hoepelbeweging uitsterft: het middelpunt is tot dicht bij de grond gedaald, de hoepel zelf vormt slechts een kleine hoek met het horizontale vlak; het contactpunt loopt snel rond in een cirkel, die bijna zo groot is als de hoepel zelf.

6. *Kantelrollen*: voortrollen, gestoord door kanteling. De hoepel loopt in een wiegelende slingerlijn, met kleine, afwisselend rechtse en linkse kantelingen. Telkens waar de baan van het contactpunt haar grootste uitwijking bereikt, is zij het sterkst gekromd, daar speelt vermoedelijk de tolbeweging nog even een rol.

7. *Scheef kantelrollen*: kringrollen, gestoord door kanteling. De bogen, door het contactpunt beschreven aan beide zijden van de gemiddelde kringrolling, zijn alle groter naar de ene kant dan naar de andere, - zeg bijvoorbeeld naar rechts groter dan naar links.

8. *Waggelzwaai*: langzaam rollen, gestoord door sterke kanteling, afwisselend naar rechts en naar links. Het is dank zij de rolling dat de hoepel niet als geheel tegen de grond slaat; telkens zinkt hij diep neer, komt tot onze verrassing weer op (als hij niet slipt), zwaait naar de andere zijde, enz.

9. *Boogzwaai*: kanteling, gepaard aan een weinig tolling. Het contactpunt beschrijft cirkelbogen, nauwer dan de hoepel zelf is, afwisselend naar rechts en naar links; elk boogje bedraagt meer dan 180°. Meestal is het maar heel even dat deze beweging zich instelt.

10. *Kantelrollen*: sterke tolling, gepaard aan een weinig kanteling. De tolling gaat steeds in dezelfde richting door, de vloerlijn wordt een kring van kartelingen met keerpunten, halverwege de keerpunten wisselt de kanteling van teken.

    In het algemene geval komen de drie wentelingen tezamen in de beweging vóór. Een paar typische bewegingsvormen kunnen als vóórbeeld dienen.

11. *Lustolling*: ga uit van de kringtolling, maar laat de verhouding van hoepelaswenteling en contactdiameter niet de waarde hebben, nodig om de beweging eenparig te maken. We krijgen nu een afwisselend dalende en weer rijzende kanteling, terwijl de kromming der vloerbaan gelijktijdig af- en toeneemt.

12. *Luskringing*: een sterk asymmetrische kanteltolling. De vloerlijn is een aaneenschakeling van lussen, die samen een cirkel beschrijven.

54. Slingertijd van een schommel.

Een goed voorbeeld van een samengestelde slinger!

Schommel bij windstil weer flink hoog, en let op de lucht die u in 't gezicht waait; u merkt duidelijk dat uw snelheid het grootst is nabij het laagste punt van de baan.

Schommel over kleine hoeken en bepaal de duur van 20 gehele slingeringen (heen en terug). Vergelijk dit met de formule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

; *l* is de afstand van het ophangpunt tot het slingerpunt, dat iets lager ligt dan het zwaartepunt van den man die op de schommel staat, dus ongeveer in het kruis.

Bepaal ook de slingertijd bij schommeling over een grotere hoek; een waarnemer vergelijkt de uitwijking met een merkteken, en zegt u telkens of u wel hoog genoeg schommelt. Zolang de uitwijkingshoek ϑ (t.o.v. de vertikaal) niet te groot is, blijft de slingertijd praktisch dezelfde; wordt ϑ echter 40° of meer, dan begint men te merken dat de slingertijd een weinig toeneemt, volgens de nauwkeuriger formule:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \tfrac{1}{4}\sin^2\vartheta\right)$$

. Naar mijn ervaring is de toeneming nog iets groter dan uit deze formule volgt, misschien doordat bij grote hoeken de demping een toenemend belang krijgt.[1)]

55. Hoe komt de schommel in beweging?[2)]

Op het eerste gezicht is er iets raadselachtigs in, dat een persoon in de schommel groter en groter slingeringen kan maken zonder zich tegen uitwendige steunpunten af te zetten.

Bekijk eens aandachtig iemand die schommelt! We beproeven zo goed mogelijk te ontleden wat hij eigenlijk doet (fig. 40).

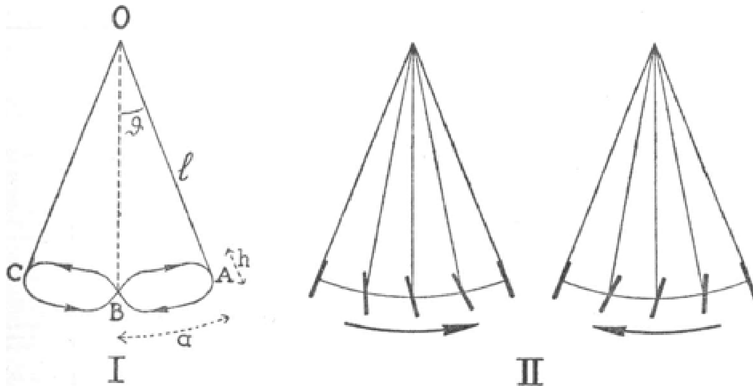


Fig. 40. Twee manieren om een schommel in beweging te houden:
I) het zwaartepunt afwisselend hoger en lager brengen;
II) het lichaam afwisselend naar voren en naar achteren doen hellen.
Gewoonlijk komen beide bewegingsvormen tegelijk voor.

I) Hij buigt en strekt de knieën; daardoor gaat zijn zwaartepunt op en neer, teken schematisch de baan ervan! **II**) Hij houdt zijn lichaam niet altijd in de richting der touwen, maar laat het vooruit of achteruit hellen; teken schematisch de stand ten opzichte der loodlijn in de verschillende delen van de baan!

Nu gaan we zien hoe de bewegingen die de schommelaar instinktmatig maakt, door de theorie verklaard worden.

1) De slingerformule schijnt nog niet uitgewerkt te zijn voor grote hoeken, wanneer er een wrijving werkt evenredig met het kwadraat der snelheid. Vgl. A. Kriloff en C.H. Müller, Enz. d. mathem. Wiss. IV, **22**, 543.

2) G.T. Walker, Enz. d. Mathem. Wiss. IV, **9**, 151.

I) Stel l = de afstand van het zwaartepunt tot de as bij gestrekte knieën, $l + h$ = de afstand bij gebogen knieën. Valt de schommel van de stand OA naar OB, over een hoek ϑ, dan daalt het zwaartepunt over $l(1 - \cos \vartheta)$ of over $(l + h)(1 - \cos \vartheta)$ al naarmate degene die schommelt de knieën strekt of buigt; de zwaartekracht verricht dus in het eerste geval minder arbeid dan in het tweede. Om de slingeringen die de schommel maakt te vergroten, moet de arbeid die men wint bij het dalen groter zijn dan wat men verliest bij het stijgen: in de dalende helft van de baan moet men dus de knieën buigen, in de stijgende helft moet men ze strekken.

II) Daarenboven kan het lichaam een zekere draaiing uitvoeren om het zwaartepunt. Men bewijst: aan het eind van de naar voren gerichte slingering moet men zich vooruit laten hellen, en aan het eind van de terugzwaai moet men achteruit gaan hellen (fig. 40).

Beproef zelf de invloed van de twee bewegingsvormen!

We zullen nu nauwkeuriger berekenen hoeveel arbeid bij elke slingering aan het stelsel meegedeeld wordt. Die arbeid wordt in laatste instantie geleverd door degene die schommelt. Als hij de laagste stand OB bereikt heeft, richt hij zich op, en heeft daarbij de *zwaarte* Mg van zijn lichaam te overwinnen, en daarenboven nog de *middelpuntvliedende kracht* Mv^2 / l; hij voelt het ook, het is alsof iemand hem met kracht neerdrukte. Deze twee bestanddelen van de kracht kunnen we gemakkelijk vergelijken, als we bedenken dat v gelijk is aan de eindsnelheid die een lichaam bereikt nadat het gevallen is van een hoogte $l(1 - \cos \vartheta)$, dus dat $v^2 = 2gl(1 - \cos \vartheta)$.

De totale kracht is:	$Mg + 2\,Mg(1 - \cos \vartheta)$,
en de verrichte arbeid:	$Mgh + 2\,Mgh(1 - \cos \vartheta)$.

Als de schommel een uitwijking bereikt van 60°, kost het overwinnen van de middelpuntvliedende kracht dus evenveel inspanning als het overwinnen van de zwaartekracht. - Deze arbeid komt niet geheel ten goede aan het stelsel: want in de uiterste stand OC hurkt de schommelaar weer neer en verliest daarbij arbeidsvermogen $Mgh \cos \vartheta$, dat door de reactie van de touwen en de tegenstand der gewrichten verbruikt wordt. Er blijft tenslotte de arbeidswinst

$Mgh(1 - \cos \vartheta) + 2\,Mgh(1 - \cos \vartheta) = 3\,Mgh(1 - \cos \vartheta)$.

56. Het schommelen zonder extra-draaiing van het lichaam, en de demping der schommelbeweging.

Quantitatief is de invloed (I) van het op- en neergaande zwaartepunt het best te bestuderen. Oefen eerst om telkens de knieën te buigen en te strekken volgens fig. 40 I, maar het lichaam onveranderlijk in het vlak der touwen te houden! Bind aan een der touwen twee stukjes koord, op de hoogte der ogen en 15 cm lager: deze merktekens geven u aan hoe diep u de knieën telkens moet buigen.

Het blijkt nu dat de schommel weldra een bepaalde slingerwijdte bereikt en daar verder niet voorbij komt; een hulpwaarnemer bepaalt die zo nauwkeurig mogelijk. De arbeid die wij bij een halve slingering verrichten wordt nu blijkbaar geheel voor wrijving van ons lichaam tegen de lucht gebruikt. Voor die arbeid vonden we 3*Mgh*(1 - cos ϑ), wat bij niet al te grote uitwijkingen *a* gelijk is aan

$$\frac{3}{2} Mgh\vartheta^2 = \frac{3}{2} Mgh\frac{a^2}{l^2}$$

. - Laten we nu de wrijving berekenen.

De afstand van de schommel tot de evenwichtsstand wordt bij benadering beschreven door

$$x = a \sin \frac{2\pi}{T} t$$

, de snelheid is dus

$$x = a \, . \, \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t = a \sqrt{\frac{g}{l}} \, . \, \sqrt{1 - x^2/a^2}$$

. De luchtweerstand geeft de schommel een vertraging welke we evenredig met het kwadraat van de snelheid stellen en die we dus schrijven:

$$k\frac{g}{l}\ (a^2 - x^2)$$

. De wrijvingsarbeid is dan bij elke halve slingering:

$$M\int_{-a}^{+a} \frac{kg}{l}(a^2 - x^2)dx = \frac{4}{3}\frac{Mgka^3}{l}$$

.

Schrijf nu dat de verrichte arbeid voor wrijving verbruikt is:

$$\frac{3}{2}\frac{Mgha^2}{l^2} = \frac{4}{3}\,\frac{Mgka^3}{l}, \text{ of } k = \frac{9}{8}\frac{h}{al}$$

De bereikte einduitwijking moet dus evenredig zijn met het hoogteverschil waarover we ons lichaam op en neer hebben bewogen. We doen ook nog eens een proef met *h* = 30 cm, en nemen 't gemiddelde der waarden van *h/a*. Voor *k* vond ik 0,029; dat wil zeggen: heeft de schommel een snelheid van 1 m/sec, dan wordt hij door de luchtweerstand bijna 3 cm/sec^2 vertraagd.

Hieruit volgt de wrijvingsweerstand van ons lichaam (dat 75 kg weegt), bij een snelheid van 1 m/sec: 1/9,81 × 75000 × × 0,029 = 222 *gram-gewicht*.

57. Nog eens de demping der schommelbeweging.

Als men aan 't schommelen is, en ineens ophoudt met bewegingen uit te voeren, vermindert de slingerwijdte langzamerhand, tot de schommel tot rust gekomen is. Het is duidelijk dat

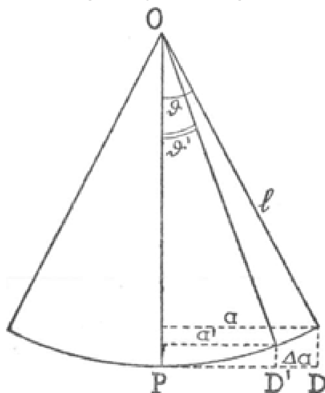


Fig. 41. Berekening van de demping der schommelbeweging.

het onderzoek van dit uitdempen ook een manier is om de wrijvingsweerstand van ons lichaam tegen de lucht te bepalen.

We zetten merktekens op 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 meter afstand van de schommel in zijn laagste stand (meet van het midden P af). Nu gaan we harder en harder schommelen tot onze voeten boven het vaste merkteken D, op 2,5 m afstand, zijn gekomen, en laten ons dan vanzelf uitslingeren. Terwijl de slingering langzaam gedempt wordt, telt een waarnemer bij de hoeveelste halve slingering (heen- of teruggang) de uitwijking teruggegaan is tot het merkteken D' van 2 m. Evenzo bepaalt hij bij welke halve slingering de volgende merktekens bereikt worden.

Het arbeidsvermogen dat we aan de schommel gegeven hadden, is nu verbruikt door wrijving van ons lichaam tegen de lucht. Als de uitwijking teruggegaan is van ϑ tot ϑ', is de verbruikte arbeid *Mgl* (cos ϑ' - cos ϑ), wat voor niet te grote uitwijkingen *a* gelijk is aan *Mgl* sin ϑ.

$$\Delta\vartheta = Mgl\frac{a\,.\,\Delta a}{l^2} = \frac{Mg}{l}a$$

. De luchtweerstand verbruikt bij elke halve slingering de arbeid

$$\tfrac{4}{3}\frac{Mgka^3}{l} \text{ (zie § 56)}$$

. Schrijf nu op dat de arbeid, die verloren wordt als de amplitude *a* met *Δa* afneemt, verbruikt wordt om N halve slingeringen te verrichten.

$$\frac{Mg}{l}a\,.\,\Delta a = \tfrac{4}{3}\frac{Mg\,ka^3N}{l}, \text{ of } k = \tfrac{3}{4}\frac{\Delta a}{Na^2}.$$

Uit metingen aan een schommel vond ik gemiddeld: Na^2 = 30 m^2 voor Δa = 0,5 m; dus k = 0,012. Hieruit volgt voor de wrijvingsweerstand van ons lichaam (dat 75 kg weegt):

1/9,81 × 75000 × 0,012 = 92 *gram-gewicht*.

De uitkomst is van dezelfde orde als we bepaald hadden uit onze eerste methode. Het gemiddelde,

$$\frac{222 + 92}{2} = 157$$

gramgewicht, is weer te vergelijken met de luchtweerstand die we op geheel andere wijze gevonden hadden voor een fietser, nml. 67 gram-gewicht (§ 32). Het is begrijpelijk dat de fietser door zijn gebukte houding een merkbaar kleinere weerstand biedt: daarenboven hebben we de wrijving van de ringen van de schommel verwaarloosd.

Hoe is de demping als men in zittende houding schommelt?

58. De plank over de sloot.

Een prachtgelegenheid om daar midden op te gaan staan en heerlijk op en neer te wippen! Men voelt onmiddellijk dat de plank met het mannetje dat er op danst een eigen trillingstijd heeft; u kunt het aantal trillingen in de loop van een minuut nauwkeurig bepalen, door zachtjes en aanhoudend op en neer te wippen terwijl u de sekundewijzer van uw horloge volgt.

Theoretisch is die trillingstijd benaderd te vinden, door de massa van de plank te verwaarlozen tegenover die van de mens. Bij alle trillende bewegingen is de slingertijd gegeven door

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\text{massa}}{\text{kracht voor uitwijking 1}}}.$$

Nu leert ons de theorie der veerkracht, dat een aan beide uiteinden gesteunde plank van lengte *l*, dikte *a*, en breedte *b*, onder de invloed van een gewicht *P* doorzakt met een pijl

$$h = \frac{Pl^3}{4a^3bE}$$

; de constante *E* is de elasticiteitsmodulus. Voor *h* = 1 is dus

$$P_{h=1} = \frac{4a^3bE}{l^3}$$

. Substitutie in vorige formule geeft:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Ml^3}{4a^3bE}}$$

; en het aantal trillingen per sekunde:

$$N = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{a^3bE}{Ml^3}}$$

.

Voor hout is $E \cong 8 . 10^{10}$ dynes/cm^2; dan moeten *a*, *b*, *l* in cm, *M* in g uitgedrukt worden. Vergelijk de uitkomst die de formule geeft met de waar-

neming. Men kan verwachten dat het aantal trillingen in werkelijkheid iets kleiner zal zijn, omdat de massa van de plank ook een rol speelt. Met deze betere benadering is het vraagstuk nog niet geheel uitgerekend.[1)]

Men kan aantonen dat, als de waarnemer niet in het midden der plank staat, maar op een afstand *ml* van het ene uiteinde en *nl* van het andere, het trillingsgetal wordt:

$$N = \frac{1}{4\pi}\sqrt{\frac{a^3bE}{Ml^3m^2n^2}}$$

Voor $m = n = ½$ komen we tot het symmetrische geval terug, en zijn de trillingen het langzaamst. Beproef dit waar te nemen!

59. Het zwiepen van een boompje.

Neemt men een jonge boom en drukt hem afwisselend naar rechts en naar links, dan buigt hij heen en weer, en men voelt weldra dat hij een eigen trillingstijd heeft. Druk zachtjes verder, steeds in datzelfde tempo, en bepaal hoeveel schommelingen de boom in 1 minuut uitvoert.

Een juiste theorie van die trillingen te geven is onmogelijk, omdat de vorm van de kroon geheel onregelmatig is. Laten we eens aannemen dat de trillingstijd niet veel zal verschillen van die ener aan het uiteinde vastgeklemde staaf, waarvan de lengte *l* gelijk is aan de hoogte van de boom, en waarvan de ronde doorsnee dezelfde middellijn *d* heeft als de boomstam beneden. Dan zou het aantal trillingen per sekunde zijn:

$$N = 0{,}14\,\frac{d}{l^2}\sqrt{\frac{E}{s}}.$$

Schat voor de dichtheid $s = 0{,}6$, stel $E = 8.\ 10^{10}$ dyne/cm^2; er komt: $N = 50.000\ d\,/\,l^2$ (*d* en *l* in cm).

Een andere wijze om het vraagstuk min of meer te benaderen is, de boom te beschouwen als een *kegelvormige* staaf, waarvan het dikke uiteinde vastgeklemd is. Dan wordt[2)]

$$N = 0{,}35\,\frac{d}{l^2}\sqrt{\frac{E}{s}} \text{ of } 125\cdot000\,\frac{d}{l^2}.$$

De veerkracht van zulk een staaf is nu kleiner dan bij een cylinder,

1) Vgl. J. Morrow, Phil. Mag. **11**, 354, 1906.
2) G. Kirchhoff, Wied. Ann. **10**, 501, 1880.

maar de massa is ook zoveel kleiner dat de trillingen toch 2,5 maal sneller gebeuren.
In werkelijkheid zou nog de massa van de kroon in aanmerking genomen moeten worden.
- Vergelijk de waarneming

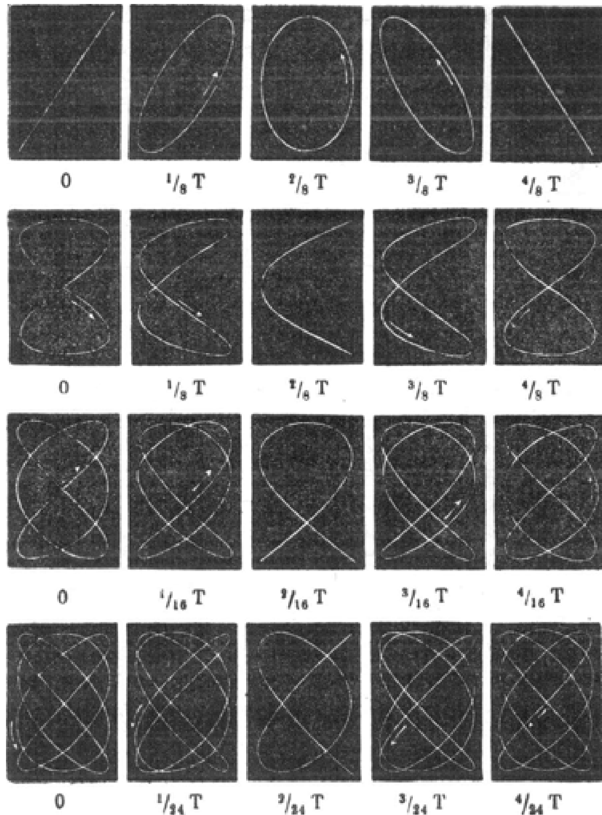


Fig. 42. Figuren van Lissajous.

met de formules! U zult zien dat deze de goede orde van grootte geven, maar niet de preciese waarde. Bepaal voor enige bomen welke getallenfaktor er moet bijgevoegd worden.

Tot hiertoe hebben we alleen gedacht aan trillingen van de boom in één bepaald vlak. Let echter eens op een gevelde boom die zò ligt dat het dunne uiteinde vrij bewegen kan: als u het

heen en weer laat zwiepen, ziet u hoe het helemaal geen rechte lijn doorloopt, maar een ingewikkelde kromme. De zaak is, dat deze stam een andere trillingstijd heeft in het éne dan in het andere vlak, omdat de takken en de houtmassa altijd min of meer asymmetrisch verdeeld zijn. Door de ongelijkheid der trillingstijden verloopt de phase der samenstellende trillingen voortdurend, en ziet men alleraardigste 'figuren van Lissajous', die zich geleidelijk vervormen (fig. 42). Alles gaat zo langzaam dat men de trillingen duidelijk met het oog kan volgen. Het schijnt zelfs mogelijk, een potlood aan de top van de stam te bevestigen en de kromme op een blad karton op te tekenen.[1)]

60. Bepaling van de snelheid van een schip.

Gooi een dichtgekurkte lege fles over boord, en tel hoeveel sekunden ze nodig heeft om de afstand af te leggen tussen vóóren achtersteven, of tussen twee vaste punten van het schip. Meet dan de afstand tussen die twee punten, en bereken de snelheid. - De Engelse zeeman noemt die eenvoudige methode: 'the Dutchman's log'.[2)]

In de zeevaart gebruikt men als eenheid van snelheid *de knoop* = 1 zeemijl per uur = 1,85 km/uur = 0,51 m/sec.

We zullen later zien, dat de snelheid ook uitstekend afgeleid kan worden uit de golflengte der dwarse golven, die zich in het zog van het schip loodrecht op de voortbeweging vormen. De schatting van die golflengte lukt het best op zeilboten, of bij kleinere schepen die men van op een brug voorbijvaren ziet. Men onthoude volgende getallen:

λ = 1,5 m	V = 5,5 km/uur
2,5 m	V = 7 km/uur
4 m	V = 9 km/uur

(Vgl. § 99).

61. Weerstand van een schip. Sleepproeven (fig. 43).

Om de weerstand vooruit te bepalen die een schip in het water ondervinden zal, maakt de scheepsbouwer een verkleind model en neemt daarmee proeven. Wij gebruiken een houten balkje, waaraan we ruw de vorm van een schip hebben gegeven, en dat we in rustig water laten drijven.

1) Ebert, Lehrb. d. technischen Physik, **1**, 310.
2) W. Thomson, On Navigation. (Popular Lectures and Adresses, blz. 43).

Om het voort te trekken terwijl we langs de oever lopen gebruiken we een lange stok, aan zijn uiteinde een dwarslatje dragend. Op dit laatste is een elastiekje *E* met een punaise bevestigd, en dit trekt ons bootje via een ijzerdraadje *y*. Door de weerstand die het vaartuig in het water ondervindt wordt het elastiekje gespannen; hoever - dat kunnen we aflezen op een duidelijk zichtbare cm-schaal, welke we op het dwarslatje hebben getekend. Loop nu zo snel, dat het elastiek tot een bepaald schaaldeel uitgerekt wordt, en laat een helper met het horloge



Fig. 43. Bepaling van de weerstand van een schip met een model.

in de hand bepalen hoeveel m/sec u aflegt (Houd het uiteinde van de stok laag, trek bijna horizontaal!). Herhaal de proef met een grotere snelheid, overeenkomend met meer weerstand en dus een grotere kracht vereisend en een sterkere uitrekking. Enz.

U kunt nu vooreerst de kracht bepalen die u in elke proef heeft moeten uitoefenen, door het elastiekje te belasten met verschillende bekende gewichten, en de overeenkomstige uitrekkingen te vergelijken met die, bij het slepen waargenomen. Teken als funktie van de snelheid welke kracht vereist was voor het voorttrekken: deze kracht neemt ongeveer met het kwadraat

der snelheid toe. Zij is nodig, zowel om de wrijving van het vaartuig tegen het water te overwinnen, als om de scheepsgolven te vormen en te onderhouden.

Verder kunt u nu van uw model overgaan tot het geval van een werkelijk schip. Vergroot in gedachte alle afmetingen van uw model in de verhouding *l*, die u willekeurig kunt kiezen. Dit vastgelegd zijnde, moet u verder de snelheid vermenigvuldigd denken met $\sqrt{l}$, de kracht met l^3. Uw proef is dan op de juiste schaal 'gelijkvormig' vergroot[1]. - Voor een balkje van 54 cm × 7 cm × 4,5 cm vond ik dat een kracht van 60 g-gewicht vereist was bij een snelheid van 2,8 km/uur. Stel nu $l = 100$; dan zou dus een schip van 54 m × 7 m × 4,5 m met een kracht van 60 ton een snelheid bereiken van 28 km/uur of 7,7 m/sec; een vermogen van

$$\frac{60\cdot000 \times 7{,}7}{75} = 6000 \text{ PK}$$

zou vereist zijn. Bij werkelijke schepen van deze afmeting zijn de vereiste kracht en het vermogen aanzienlijk geringer, dank zij de zorgvuldig gekozen vorm van de romp.

Dergelijke proeven gaan nog mooier met een echte roei- of zeilboot. Aan een der zijden bevestigt u een touw en een (goedkoop) veerbalansje, en laat u voorttrekken door een helper die langs de oever loopt, terwijl u zelf met het roer de goede koers houdt.

Men zou de te onderzoeken boot ook kunnen laten voortslepen door een motorboot. Het blijkt dan echter, dat men buitengewoon voorzichtig moet zijn met het trekken van besluiten, *omdat de kracht, nodig voor het slepen, in sterke mate van de lengte der lijn afhangt*. Naarmate de lijn wordt gevierd, vindt men dat de vereiste kracht, op de veerbalans afgelezen, eerst geleidelijk toeneemt, dan afneemt, dan weer toeneemt, enz., met een periode gelijk aan de lengte der golven die zich achter de sleepboot vormen; de grootste waarde der kracht is wel *dubbel* zo groot als de kleinste. De vereiste kracht is het geringst, wanneer het meegesleepte bootje op de vóórkant komt te liggen van de eerste zichtbare dwarsgolf (vgl. § 99).

62. Het sturen (fig. 44).

Ieder die zelf wel eens in een bootje heeft gezeten of een schip in een singel heeft zien sturen, weet dat het uiteinde van 't roer dat buiten het schip uitsteekt naar *links* of naar *rechts* moet

1) Dit geldt streng voor de 'golfvormende' kracht, maar met enige benadering ook voor de totale weerstand.

gedraaid worden, om ook het schip naar *links* of naar *rechts* te doen afwijken. In fig. 44 is voorgesteld hoe de waterdruk AB tegen het roer een componente AC heeft, die de draaiing van het schip naar links: tengevolge heeft.

De mate waarin het roer werkt hangt af van de hoek waaronder het t.o.v. de vaartrichting wordt ingesteld. Bij een smal roer

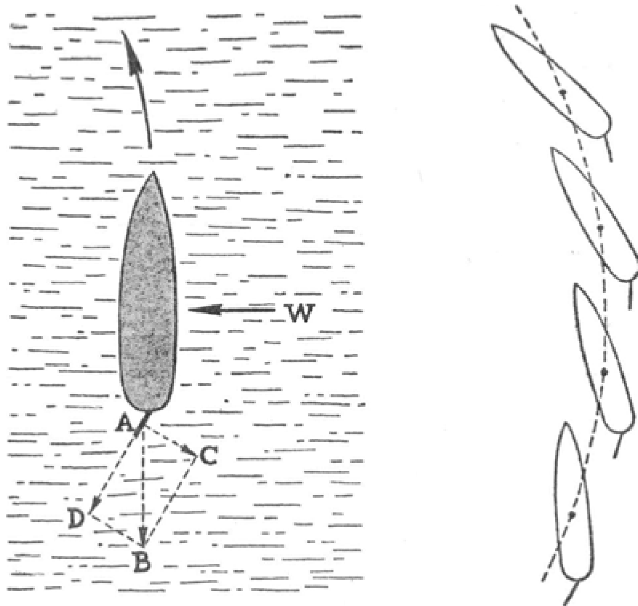


Fig. 44. Het sturen van een schip met behulp van het roer.
a) Krachten die het water op het schip uitoefent.
b) Invloed van het roer op de koers van het schip.

bereikt men de sterkste werking bij een hoek van 20° ongeveer; bij een breed roer kan de optimale hoek tot 40° bedragen.

Op het ogenblik waarop men het roer snel naar links (of naar rechts) draait, begint het schip met een weinig *naar de binnenkant* van de bocht te hellen, wegens de drukking van het water op het roer, waarvan het drukpunt lager ligt dan het zwaartepunt van het vaartuig. Weldra echter gaat het schip de bocht maken, en nu helt het *naar buiten* (aan de binnenkant van de bocht ligt het dek hoger). Verklaring: de waterweerstand levert een componente W, die het schip naar links drukt en die de centripetale kracht is waardoor het schip de bocht maakt; zij grijpt ongeveer

aan in het midden van het ondergedompelde gedeelte; de centrifugale traagheidskrachten echter in het zwaartepunt, dat hoger ligt. Er ontstaat dus een koppel, en de helling die we hebben waargenomen is begrijpelijk.[1] Tegenover dat koppel was de druk van het water op het roer onbelangrijk. Toch merkt men zijn bestaan, als tijdens het beschrijven der bocht het roer weer ineens in de middenstand teruggebracht wordt: het schip krijgt dan even een grotere slagzij. De druk van het water tegen het roer heeft echter niet alleen voor gevolg dat het schip gaat draaien, hij verplaatst ook enigszins het schip als geheel buiten de koerslijn, naar de zijde van de buitenbocht (fig. 44*b*).

Bij schepen met een schroef heeft deze altijd invloed op het sturen, doordat ze stromingen veroorzaakt in het water om het roer. Deze invloed is in vele gevallen zo ingewikkeld, dat men niet meer theoretisch kan berekenen wat er zal gebeuren, maar dat de ervaring moet beslissen.[2] - Denk u bijvoorbeeld een stoomboot, door een schroef met flinke vaart gedreven; plotseling dreigt een aanvaring, en men laat de schroef met volle kracht achteruit werken. Het schip gaat echter door de vaart die het had nog een eindje *vooruit*, over een afstand van 4 tot 6 maal de lengte van het schip, terwijl de schroef toch reeds *achteruit* draait. Vrage hoe het roer op dit ogenblik werkt! - Men begrijpt zonder moeite hoe buitengewoon gewichtig deze vraag is voor het manoeuvreren gedurende deze kritieke ogenblikken.

Antwoord. - 1. Als de schroef achteruit draait, zal het roer werken alsof het schip inderdaad achteruit voer, ook al moge het zich feitelijk vooruit bewegen.

2. Toch zal de werking van het roer nu minder afdoende zijn dan als het schip werkelijk achteruit zou stomen; hoe sneller het door zijn traagheid nog vooruit beweegt, hoe meer dit de invloed van de schroefbeweging op het roer zal tegengaan. In de praktijk wordt volledige neutralisatie niet bereikt, maar wel wordt het schip slecht bestuurbaar en zeer beïnvloed door wind enz.

3. Als omgekeerd de schroef het schip vooruit drijft, zal het roer werken alsof het schip inderdaad vooruit voer, ook al beweegt het feitelijk door zijn traagheid achteruit.

Het roer werkt des te krachtiger naarmate een schip sneller vaart. En dit is niet alleen zó bedoeld, dat het schip in korter tijd draait over een gegeven hoek, maar ook, dat de cirkel die

1) Klein en Sommerfeld, Theorie des Kreisels, blz. 915.
2) O. Reynolds, Papers, **1**, 134 en vgl. (1875-1878).

het beschrijft een kleinere straal heeft. Bij volle snelheid kan een schip een cirkel beschrijven met een straal van slechts 4 scheepslengten. - Een schip is natuurlijk maar bestuurbaar als het vaart heeft ten opzichte van het water; bij het afvaren ener rivier moet het dus sneller stroomafwaarts bewegen dan het water.

63. Roeien.

Het brede uiteinde van de riem ontmoet zoveel tegenstand in het water, dat we het als een bijna vast draaipunt kunnen beschouwen. De riem werkt dan als hefboom, met de ‘kracht’ aangrijpend bij het uiteinde, de ‘last’ aangrijpend bij de dol. Bij elke riemslag beschrijft de riem een hoek van wel 80°; en de boot zou volgens ons hefboomschema telkens moeten vooruitschieten over ongeveer 3,50 m. De werkelijkheid is echter iets minder gunstig: het uiteinde van de riem is niet geheel onbewegelijk, het ‘slipt’ over een afstand van de orde van 1 m ten opzichte van het water, zodat de boot feitelijk maar 2,50 m vooruitkomt.

Interessant is de reaktie van de boot wanneer de roeier, na het uitvoeren van de eigenlijke slag, op zijn bewegelijk bankje ‘vooruit’ schuift, d.w.z. tegen de vaartrichting in beweegt. Aangezien het zwaartepunt van roeier + roeiboot ongestoord met eenparige snelheid verder moet bewegen, zal de verschuiving van den roeier gepaard gaan met een impuls, uitgeoefend in de vaartrichting. Men kan dit inderdaad bij elke slag opmerken.

Een ander typisch reaktieverschijnsel ontstaat als de roeier plotseling rechtop gaat staan in de boot: men ziet dan hoe het vaartuig een ogenblik dieper in het water wordt gedrukt. Even later gaat de roeier plotseling zitten: de druk van het lichaam op de boot neemt nu af en het vaartuig wordt plotseling een eindje opgetild.

Het is echter niet de houding van den roeier die op zichzelf zijn gewicht groter of kleiner maakt: zodra de opwaartse of benedenwaartse versnelling ten einde is, wordt de drukking die hij op de boot uitoefent weer gelijk aan zijn lichaamsgewicht. Denk in dit verband ook aan de bewegingen van den skiloper, die hurkt wanneer hij de druk op de ski's geringer wil maken, en die rechtop gaat staan om de druk te versterken. Dergelijke bewegingen helpen alleen gedurende het korte ogenblik waarop ze uitgevoerd worden, zolang namelijk het lichaam een neerwaartse of opwaartse versnelling krijgt. Als zodanig hebben ze zin, bijvoorbeeld wanneer het verval van het terrein plotseling geringer

wordt en daarna weer groter, hetgeen de drukking op de ski's zou doen toenemen, daarna weer afnemen; dit kan de skiloper een ogenblik compenseren, wanneer hij hurkt en zich dan weer opricht. Maar zodra de beweging weer eenparig wordt is de druk in beide standen natuurlijk dezelfde.

64. Het wrikken.

Een merkwaardige vorm van roeien is *het wrikken*, met één riem, die gehanteerd wordt bij de achtersteven, waar hij schuin naar beneden in het water dompelt. Stel u eerst een ogenblik voor, dat de riem eenvoudig van links naar rechts zou bewegen en daarna weer terug, met zijn vlak vertikaal:

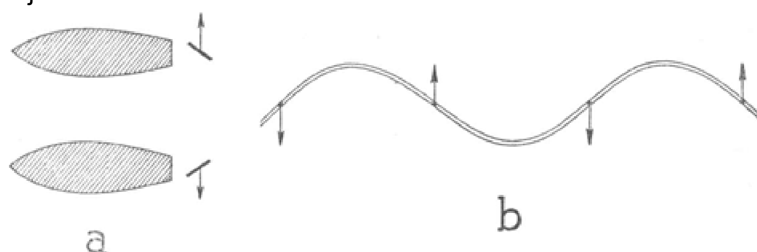


Fig. 45. Het voortbewegen van een boot door wrikken. - Zeer vereenvoudigde voorstelling. De pijltjes geven de bewegingsrichting van de riem aan.

het is duidelijk dat beide delen van de beweging elkanders werking dan zouden opheffen. Dit wordt echter anders, wanneer het vlak van de riem tevens, zowel bij de heen- als bij de teruggang, in de juiste stand tegenover de zijdelingse bewegingsrichting gebracht wordt. Fig. 45*a* stelt dit geschematiseerd voor, alsof de riem geheel vertikaal in het water dompelde en wij hem van omhoog bekeken. Men ziet dat de tegenstand van het water in beide phasen van de beweging een druk loodrecht op het riemblad uitoefent, die telkens een sterke voorwaartse componente heeft; de zijdelingse componenten bij de heen- en bij de teruggang zouden de boot een slingerlijn doen beschrijven, maar volgen zo snel op elkaar dat ze praktisch elkander opheffen.

Het is de moeite waard, de wrikbeweging ook nog te beschouwen van het standpunt van de rustende waarnemer die aan de oever staat en het bootje gadeslaat. Deze ziet de riem een golflijn door het water beschrijven; de tegenstand van het water maakt dat de riem zich als het ware in een sinusvormige gleuf beweegt. Doordat hij telkens op het juiste ogenblik zijdelings tegen deze

gleuf drukt, zoals het door de pijltjes in fig. 45 is voorgesteld, glijdt hij langs de hellingen der sinuskromme en wordt voortdurend voorwaarts gestuwd. - Het is met behulp van een dergelijk mechanisme dat de vissen zich voorwaarts bewegen: ze buigen hun lichaam tot een sinuslijn, en glijden nu bij benadering langs dezelfde kromme voorwaarts, telkens nochtans een zijwaartse druk uitoefenend op de juiste punten van hun flanken. Slangen,

Fig. 46. Analyse van de wrikbeweging.

hagedissen, wormen schijnen een dergelijk mechanisme toe te passen; de mens gebruikt deze mogelijkheid van voortbeweging bij de crawl-slag.

Hier volgt nu een nauwkeuriger onderzoek van de wrikbeweging, waarbij rekening gehouden is met de helling van de riem ten opzichte van de vertikaal.
Denk de dol O in het centrum van een grote bol (fig. 46); een bepaalde *richting* wordt dan weergegeven door een straal van die bol en door een *punt* op het boloppervlak. De boot vaart in de richting OM', OM is de naar achteren gerichte horizontale lijn; het ondergedompelde uiteinde van de riem wijst naar A, de riem helt over een hoek α = MA met de horizon HMM'. Het riemvlak zij eerst loodrecht op het vertikale symmetrievlak van de boot, de normaal op het riemvlak heeft dan de richting OB. Nu draaien we het riemvlak over een hoek BC = β om de lengteas van de riem, de normaal wijst nu naar C. - Op dit ogenblik is het ondergedompelde riemeinde aan het bewegen van stand E' naar stand E en gaat net door A, zijn snelheid is dus evenwijdig aan OH. De tegendruk van het water drukt dus volgens HO, daarvan werkt loodrecht op het riemvlak het breukdeel cos HC; en daarvan weer is het breukdeel

cos CM werkzaam in de vaartrichting. De werkzame kracht is dus tenslotte evenredig met cos HC . cos CM = sin β . cos CB . cos MB = sin β. cos β. sin α = ½ sin 2β. sin α. Altijd is CM < 90°; willen we dus de uitdrukking positief houden (= voorwaarts varen), dan moet ook CH < 90°: de naar boven gerichte normaal moet dus altijd afwijken van het symmetrievlak, in de richting naar waar het ondergedompelde riemuiteinde beweegt. De sterkste voorwaartse werking wordt bereikt als α zo groot mogelijk is en als 2β = 90°, dus als de riem zo steil mogelijk in het water dompelt, en als zijn vlak 45° gedraaid is om de lengteas (uitgaande van de symmetrische stand). In de praktijk kiest men de steilheid niet te groot, omdat de vereiste inspanning te aanzienlijk zou zijn.
Tevens ziet men, dat de boot niet alleen vóóruit gestuwd wordt, maar dat er ook een krachtcomponente is die de achtersteven naar beneden drukt; zij is evenredig met cos CH . cos CP = sin β . cos β . cos α. Als het wrikken met grote krachtinspanning geschiedt, kan men dit neerwaarts drukken duidelijk aan de boot opmerken.
De hier geschetste theorie geeft slechts de hoofdtrekken weer van de wrikbeweging; feitelijk gaat de riem niet slechts horizontaal heen en weer: hij beschrijft een zeer vlakke, liggende ∞ (stippellijn EAE' in fig. 46).

65. De zeilboot.

Rank en luchtig, blank en strak snelt de zeilboot over het water. Schijnbaar zo eenvoudig is deze beweging; in werkelijkheid

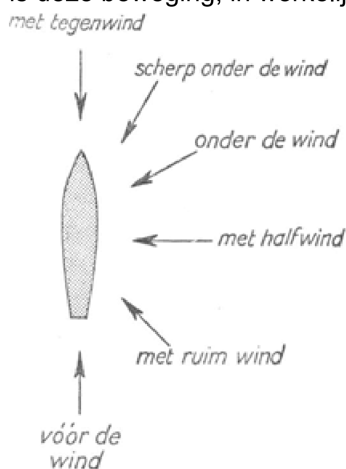


Fig. 47.

ontstaat ze door eenverfijnd wisselspel van wind- en waterstromingen, dat verstoord wordt door de geringste wijziging in bouw of verhoudingen.

Om de luchtstroming om de zeilen te onderzoeken, maken we gebruik van een pluisje, - hetzij een donsvlokje of een distelzaadje - opgehangen aan een stok met behulp van een lang vrouwehaar; het volgt getrouw elke stroomlijn, het verraadt iedere werveling.

Een uitstekend uitgangspunt voor onze bestudering is de toestand bij het zeilen ‘onder de wind’ (fig. 47); de wind komt dan schuin van voren, de boot vordert schuin tegen de wind in. We onderzoeken vooreerst de windstroming aan de loefzijde, langs het grootzeil (fig. 48): de luchtstroom breekt open tegen
[1)]

1) M. Curry: Die Aerodynamik des Segels und die Kunst des Regatta-Segelns (*M*ünchen 1925).

het zeil, maar op typisch asymmetrische wijze; over het eerste vierde deel van de breedte stroomt de lucht naar voren, over de laatste drie vierden naar achteren; aan de bovenkant van het zeil stijgt de stroom opwaarts. Nu verkennen we de stromingen aan de randen: aan het achterlijk stroomt de lucht bijna evenwijdig aan het zeil weg; daarentegen dringt een felle windstroom aan het vóórlijk tussen mast en grootzeil naar de achterkant. Om

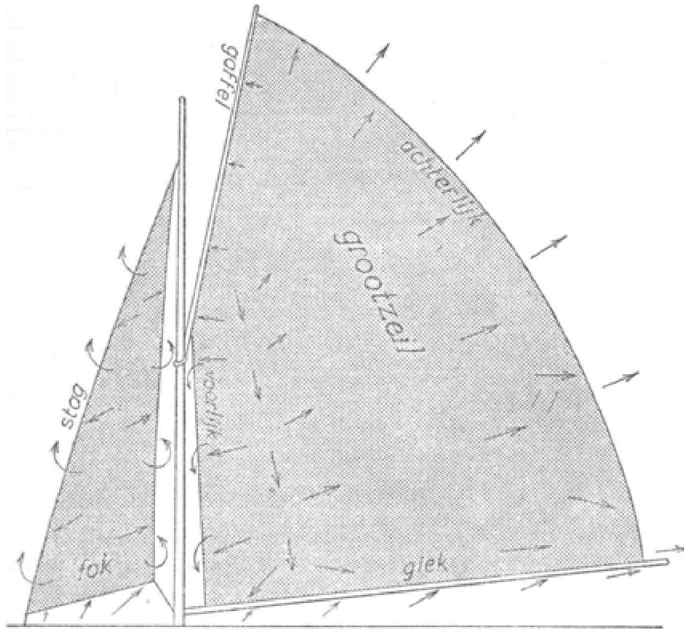


Fig. 48. Windstromingen bij een zeilboot, van de loefzijde gezien; wind van links voren. (Vrij naar Curry t.a. pl.).

te zien wat er verder met deze lucht gebeurt, verwijderen we vooreerst het fokzeil, en onderzoeken nu de lijzijde van het grootzeil (fig. 49*a*). We bevinden dat de windstroom van het vóórlijk een grote wervel *W* beschrijft en het grootzeil aan de lijzijde treft in *C*, nog vóór het midden; aan de lijzijde, achter het midden, bij *D* vinden we slechts kleine, onregelmatige werveltjes. De gehele toestand nadert dus in hoge mate tot het klassieke stroomlijnenbeeld van een vlakke plaat, schuin in een stromende vloeistof gehouden (fig. 66). Door vernuftige metingen kan men laten zien,

dat de wind niet alleen een druk uitoefent aan de loefzijde, maar ook een zuiging aan de lijzijde; deze laatste is zelfs 3 tot 5 maal sterker dan de druk: *het zeil wordt dus feitelijk door de wind voortgezogen*, *veel meer dan voortgeblazen*! De zuiging wordt echter ten dele opgeheven door de terugstroom van de werveling die de lijzijde van het grootzeil treft. Nu echter is het ogenblik gekomen om de grote betekenis van het fokzeil te leren kennen! Zodra dit gehesen wordt, verandert de stroming aan de lijzijde van het grootzeil

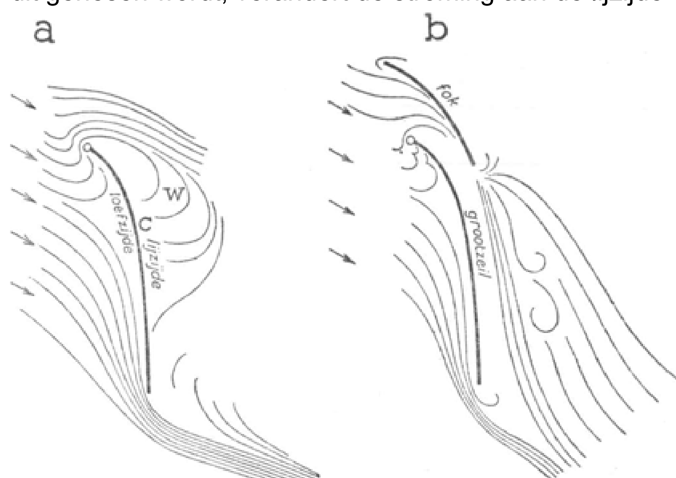


Fig. 49. Windstromingen om een zeilboot *a*. zonder fok, *b*. met fok. In de linkerfiguur hoort nog de letter *D* te staan, 2 cm onder *C*.
(Vrij naar Curry t.a. pl.).

ten enenmale (fig. 49*b*). De lucht stroomt nu met grote vaart, bijna laminair, eerst tussen fokzeil en grootzeil, daarna langs de hele lijzijde van het grootzeil. De grote wervel *W* aan de vóórkant oefent nog wel zijn zuigkracht uit, maar de terugstroom kan het grootzeil niet meer bereiken; de zuiging is nu de grootst mogelijke.

De drukverdeling op het grootzeil vertoont nog deze belangwekkende bijzonderheid: hoe meer we het achterlijk naderen, des te geringer wordt de druk aan de loefzijde; tenslotte gaat hij over in een zuiging, welke die aan de lijzijde dikwijls overtreft. Daardoor ontstaat het bekende ‘killen’ van het achterlijk: een onregelmatig fladderen en loefwaarts bewegen.

Met opzet naait men de zeilen hol, en laat ze voldoende losheid, zodat ze door de wind gewelfd worden: het is gebleken dat de wind sterker werkt op gewelfde dan op vlakke zeilen; de gunstigste

welving heeft een pijl van de orde van 1/10 van de breedte.

Typisch zijn de *afdekkingsverschijnselen* die de ene zeilboot op de andere kan uitoefenen; ze zijn het duidelijkst als men vóór de wind zeilt of met ruime wind. Op afstanden kleiner dan twee

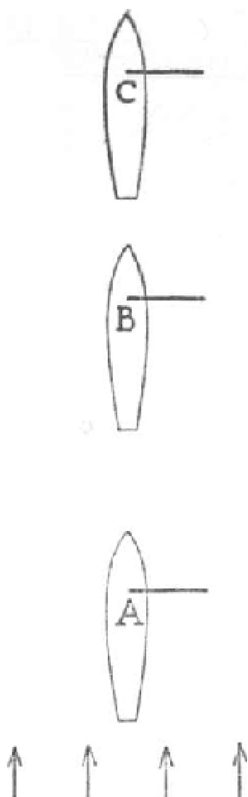


Fig. 50. Onderlinge afdekking bij zeilboten.

mastlengten blijkt het schip A de wind weg te vangen van het schip B; daarbij komt, dat door een merkwaardige terugwerking de wind nu nog iets sterker op A werkt dan wanneer B er niet was: de zuiging achter het zeil wordt versterkt. Onverwacht is ook, dat een boot C, die lijwaarts van de reeds afgedekte boot B voorbijgaat, vrijwel geen afdekkingseffekt ondergaat.

Een der wonderlijkste manoeuvres die we met de zeilboot kunnen uitvoeren is het *laveren*, waardoor de boot tegen de wind in vooruitkomt. Het berust op een dubbele ontbinding van krachten (fig. 51). 1°. De wind oefent op het zeil een kracht uit, waarvan de ene componente langs het zeil werkt, terwijl de voornaamste componente een loodrechte druk AB uitoefent. 2°. De boot gehoorzaamt echter aan die kracht niet, omdat de romp, de beide zwaarden en het roer zulk een sterke weerstand bieden; min of meer vrij beweegt de boot alleen volgens zijn aslijn, alsof hij in die richting op geleidende rails liep. Van de winddruk AB zal dus alleen die componente AC een uitwerking hebben, welke een beweging volgens de aslijn van de boot veroorzaakt: ze doet hem schuin tegen de wind

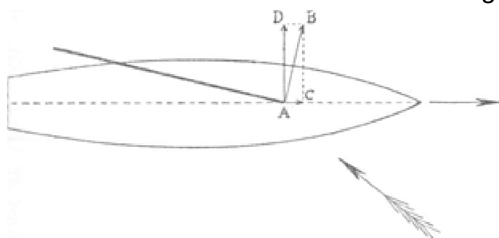


Fig. 51. Het beginsel van het laveren.

in vorderen. (Helemaal is dit niet waar: de boot drijft altijd een weinig af, en wel kan zijn koers daardoor 3° tot 10° afwijken van de bedoelde). - Door nu afwisselend schuin naar rechts en schuin naar links te sturen, komt de boot tenslotte pal tegen de wind in vooruit.

Men heeft wel eens getracht te berekenen, onder welke hoek gevaren moet worden om bij het laveren zo snel mogelijk tegen

wind in te vorderen. Zeilt men te scherp onder de wind, dan is de componente die het schip in beweging brengt te klein; zeilt men dwars op de wind, dan is de stuwende kracht aanzienlijk, maar de af te leggen weg wordt oneindig lang; daar tussenin is de gunstigste koers, waarvoor men heel aardig een hoek van 60° met de windrichting berekent. De werkelijke omstandigheden zijn echter veel ingewikkelder; het is stellig onjuist, de kracht van de wind op het zeil evenredig te stellen aan de cosinus van de invalshoek. Het vraagstuk is aerodynamisch en kan niet tot de regeltjes der schoolmechanica herleid worden.

66. De stabiliteit van een schip in rust.

De volgende eenvoudige metingen geven ons een denkbeeld van de voornaamste methoden die men in de praktijk toepast. Men kan ze al bij een gewone roeiboot uitvoeren, maar moet bedenken dat dan allerlei formules niet zo goed meer uitkomen,

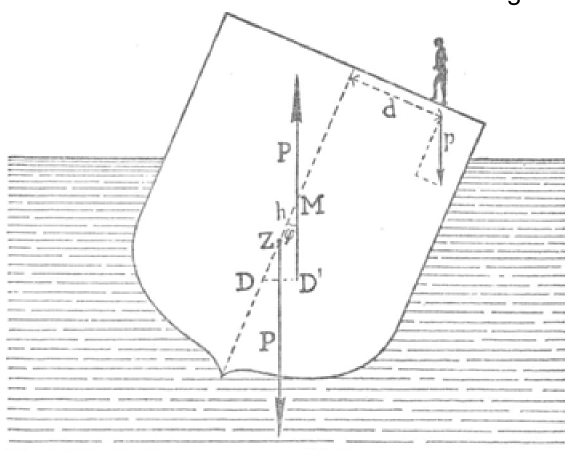


Fig. 52. Het onderzoek naar de stabiliteit van een schip.

welke verkregen zijn door de omtrekken van het schip door een rechthoek te benaderen. Het gemakkelijkst te onderzoeken is de stabiliteit om de lengte-as.

Vooreerst trachten we zo goed mogelijk een tekening op schaal te maken van de *omtrek* van het schip op de hoogte der waterlijn. Als we nog kunnen meten hoe diep de kiel onder water daalt, krijgen we een schatting van *het verplaatste watervolume* V, dus

ook van *het gewicht van het schip* G. Door in het schip te meten hoe breed de romp op verschillende diepten is, krijgen we een *dwarse doorsnede* door het midden van het schip.

Evenals bij elk natuurkundig onderzoek naar stabiliteit, beproeven we het schip uit zijn evenwichtsstand te brengen door er een kleine storende kracht op te laten werken. We gaan bijvoorbeeld zelf op het dek staan, op een afstand *d* van het midden, en kijken hoe scheef het schip zich instelt door die asymmetrische belasting (fig. 52); beoordeel de helling aan de hoek tussen een schietlood en de mast of een aan de boot gespijkerd latje). Stel de helling *φ* grafisch voor als een functie van uw afstand tot het midden van de boot! Is het een grote boot, laat dan verscheidene helpers plaats aan dek nemen! De twee gelijke krachten *P* die op de boot werken, zwaartekracht en opwaartse druk, grepen eerst aan in het zwaartepunt Z en in het drukpunt D. Als de boot kantelt blijft Z op zijn plaats, maar D verschuift, in het geval van onze figuur naar D', rechts van D, omdat het ondergedompelde gedeelte van het schip rechts zoveel dieper dan links reikt; de lijn DD' is meestal ongeveer waterpas. Het koppel dat de boot terugdrijft naar de evenwichtsstand is gelijk aan het koppel dat we veroorzaakt hebben, door ons gewicht *p* een eind buiten het symmetrievak te brengen; dus:

$$Ph \sin \varphi = pd \cos \varphi$$

$$\text{of } h = \frac{pd}{P \operatorname{tg} \varphi}.$$

Het punt M waar de opwaartse druk na kanteling de symmetrielijn van het schip snijdt, is het beroemde *metacentrum*, en de hoogte van M boven het zwaartepunt is *de metacentrische hoogte h* = MZ. Het is natuurlijk helemaal niet zeker dat dit ‘metacentrum’ werkelijk een vast punt ten opzichte van het schip is. Integendeel, in de praktijk blijkt algemeen dat de metacentrische hoogte verandert naarmate het schip verder helt; men beoordeelt de stabiliteit naar de metacentrische hoogte voor hellingen kleiner dan 15°. Zij is meestal van de orde van 0,5 m. Zeer gevaarlijk is het als de metacentrische hoogte bij grote hellingen sterk afneemt: het schip kan dan in een storm kapseizen. De stabiliteit is des te groter, naarmate de metacentrische hoogte aanzienlijker is. Als men echter om dit te bereiken het zwaartepunt zo laag mogelijk tracht te leggen, wordt het schip te sterk onderhevig aan de werking der golven: ze grijpen op de hoogte van de waterspiegel aan, en beschikken dan over een lange hefboomsarm. Meestal heeft de scheepsbouwer een tussen-

weg gezocht; men kan aannemen, dat zich het zwaartepunt, van de kiel gerekend, op ⅔ van de afstand tot het hoogste doorlopende dek bevindt.

Het is ook belangwekkend, *de ligging van het drukpunt* D te bepalen. Gewoonlijk bevindt zich dit op een diepte 0,40 *T* onder de waterspiegel bij schepen, 0,35 *T* bij kleinere boten, wanneer

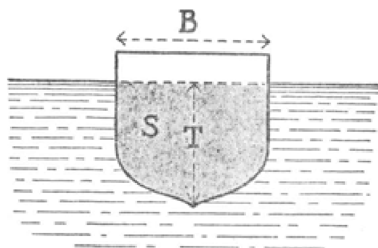


Fig. 53.

T de grootste diepte onder de waterspiegel voorstelt die men in het vaartuig aantreft. Er is ook een betrekking die de afstand van het drukpunt tot het metacentrum aangeeft. We gaan uit van de dwarse doorsnede van het schip, die we getekend hadden en bepalen de inhoud *S* van de daardoor omsloten figuur, voor zover ze zich onder de waterspiegel bevindt (fig. 53). Als *B* de grootste breedte van het dek is, vindt men voor de afstand van het metacentrum boven het drukpunt[1]:

$$\mathrm{MD} = \frac{B^3}{12\ S}.$$

De ervaring leert, dat het oppervlak *S* slechts weinig kleiner is dan ⅘ *BT*, zodat men een eenvoudige formule voor de praktijk krijgt:

$$\mathrm{MD} \approxeq \frac{B^2}{10\ T}.$$

Een door mij onderzochte roeiboot had de vorm die in fig. 54 getekend is; de kiel lag 0,27 m onder de waterlijn, de totale

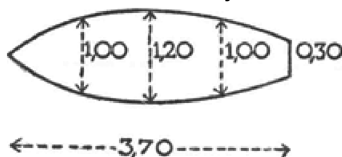


Fig. 54.

hoogte was 0,45 m. Ik schatte op het oog het volume van 't verplaatste water op 0,15 maal de inhoud van het blok, waarin de boot zou plaatsvinden; dus op 3,7 × 1,2 × 0,45 × 0,15 = 0,3 m^3, het gewicht van de boot dus op 300 kg. Het zwaartepunt moest op ⅔ × 0,45 = 0,30 m boven de kiel liggen, dus ongeveer in de waterspiegel.

Als iemand, die 70 kg woog, 36 cm buiten de as van de boot

1) Zie b.v. Grimsehl, Lehrb. d. Phys. **1**, 283, uitgave 1923.

stond, helde deze over een hoek van 0,15 rad. De metacentrische hoogte was dus

$$\frac{70 \times 0{,}36}{0{,}15\ (300 + 70)} = 0{,}45 \text{ m}$$

; dit was dus tevens ongeveer de hoogte van het metacentrum boven de waterspiegel. Het drukpunt moet ongeveer 0,35 × 0,27 = 0,09 m diep hebben gelegen. Ter contrôle: volgens een andere van onze formules moet de afstand van drukpunt tot metacentrum

$$\frac{(1{,}2)^2}{10 \times 0{,}27} = 0{,}53 \text{ m}$$

zijn; dit klopt wel met de vorige schattingen.

Op een dergelijke manier kan men de stabiliteit onderzoeken ten opzichte van de dwarse as van het schip, door vóóraan te gaan zitten, de overlangse helling te meten, enz.

67. De stabiliteit van de voortgaande beweging bij een schip.

We spreken van een stabiele bewegingsvorm, wanneer een kleine storing, die daarop heeft ingewerkt, langzamerhand vanzelf uitdempt; de beweging is integendeel labiel, wanneer zulk een storing vanzelf groter en groter wordt en het schip steeds verder van de oorspronkelijke bewegingswijze doet afwijken.

Laten we vooreerst eens onderstellen dat de kracht, die het schip voortbeweegt, in het middelpunt van het vaartuig aangrijpt (voorbeeld: centrale mast met symmetrisch zeil).

Hoe zonderling het ook moge schijnen, de beweging van het schip in de richting zijner lengte-as is nu labiel! De beweging in de dwarsrichting is daarentegen stabiel. Men zal dus verplicht zijn telkens met het roer de kleine afwijkingen te compenseren, die anders het schip steeds verder van zijn normale stand zouden verwijderen; als het aan zichzelf werd overgelaten, zou het zich altijd loodrecht op de bewegingsrichting instellen. Dit is tenslotte een bijzonder geval van de algemene stelling, dat lichamen die door een weerstandbiedende middenstof bewegen, zich meestal in de richting van de grootste weerstand instellen.

Hoe is het nu met een werkelijke zeilboot? De krachten, die de wind op een zeil uitoefent kunnen vervangen gedacht worden door één enkele kracht, aangrijpend in het *zeilpunt*. Dit punt ligt niet in het meetkundige middelpunt van het zeil, maar altijd dichter naar de aanblaasrand toe (de rand van waar de wind aankomt). Of de beweging van de boot stabiel of labiel is, hangt af van de ligging van dit zeilpunt ten opzichte van het *lateraalpunt* = het punt, waarin de weerstandskracht van het water aangrijpt. Het duidelijkst merkt men de eigenschappen van het vaartuig bij *halfwind* (wind loodrecht op de vaartrichting). Ligt het zeilpunt te

ver naar achteren, dan wordt de boot 'wreed op het roer' (loefgierig): hij wil oploeven en zijn steven tegen de wind in richten. Ligt het meer naar voren, dan is de boot 'flauw op het roer' ('lijgierig') en heeft neiging af te houden, zich met de wind mee te richten.

Bij een stoomboot, die met een schroef aan de achtersteven wordt aangedreven, is de beweging natuurlijk in sterke mate labiel. Het schip kan zijn koers slechts behouden, doordat de roerganger voortdurend de instelling van het roer wijzigt. Deze kleine zigzagbewegingen van het schip zouden ook in een ideaal rustige zee onvermijdelijk zijn.

Door deze beschouwingen kan men de volgende eenvoudige waarnemingen verklaren[1]:

1. Veel van de scheepjes die de kinderen over waterplassen laten varen, kunnen met geen enkele instelling van zeilen of roer behoorlijk voor de wind zeilen, omdat hun zeilpunt niet voldoende naar voren ligt; ze leggen zich altijd na korte tijd dwars op de wind.
2. De tros van een schip dat men door een kanaal voorttrekt is gewoonlijk aan de zijde van dat schip bevestigd. Men ziet altijd de tros zich zó instellen, dat hij de as vóór het middelpunt treft.
3. Als men een roeiboot schuin tegen de wind in roeit, moet de riem aan de lijzijde harder roeien, om te verhinderen dat de boot dwars op de wind zou gaan liggen. Iets dergelijks merkt men bij het sturen van een zeilboot.

68. De beweging van een schip in volle zee.

Heeft u wel eens op de brug gestaan van een groot stoomschip, bij opklarend weer, als zon en blauwe lucht al stralen tussen de wolken, terwijl de zee nog woest is en sneeuwwit schuim de golven bekroont? Dan kunt u zien hoe schoon het schip tussen de zeeën beweegt, hoe die combinatie van kromme banen en versnellingen en traagheidskrachten, die geen mechanica beschrijven kan, een eigen gevoelswaarde heeft, een epische grootsheid als die van oude heldensagen. Telkens weer bukkend en telkens zich verheffend, eentonig in hardnekkigheid en toch nukkig in veelvormige deiningen, baant het zich een weg door de eindeloze watermassa.

De spraakmakende gemeente zelf heeft al aangegeven hoe men de grillige beweging van het schip in twee trillingscompo-

1) W. Thomson en P.G. Tait, Treatise of Natural Philosophy; Cambridge 1879.

nenten kan ontbinden, door het invoeren van de woorden *slingeren* (om de lengte-as) en *stampen* (om de dwarse as).

Om een denkbeeld te krijgen van het bedrag waarover het schip helt, kan men bijvoorbeeld een schietlood ophangen, en kijken hoeveel dat uitwijkt; of in de badkamer meten hoe scheef de waterspiegel in de badkuip schijnt te staan bij de ergste hellingen die het schip krijgt. Maar bij dergelijke waarnemingen merkt men al gauw dat de traagheid van schietlood of watermassa tot fouten aanleiding geeft: ze stellen zich niet onmiddellijk in volgens de ogenblikkelijke stand, en ze schommelen nog na.

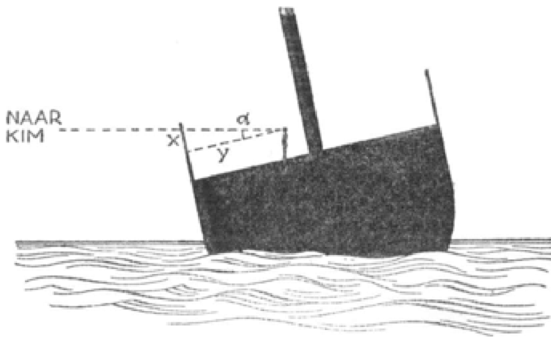


Fig. 55. Het meten van de slingering van een schip.

U bedenkt echter vanzelf een beter middel, als u aan dek bent en de gezichteinder op en neer ziet gaan ten opzichte van de reling van het schip, des te meer naarmate dit sterker helt (fig. 55). Een lijn van ons oog naar de gezichteinder is altijd horizontaal; stel we staan op een afstand y van de reling, en we zien de horizonlijn zich over een hoogte x langs het hekwerk verplaatsen, dan is tg $\alpha = x/y$. Meestal zijn de hoeken zo klein, dat x/y rechtstreeks α in radialen geeft. Niets is eenvoudiger dan enkele merkstrepen (bv. op 5 cm van elkaar) op een der loodrechte stangen van de verschansing te tekenen; zich op een vaste, eens en vooral gemeten afstand van daar op te stellen, en de hoogte in cm te bepalen waarover de horizonlijn op en neer gaat. U kunt de bepaling evengoed in de lengterichting als in de dwarsrichting uitvoeren, en zo het slingeren en het stampen achtereenvolgens bepalen.

Bij rustig weer blijven op een oceaanschip de uitwijkingen dikwijls binnen 1°. Bij storm worden ze 10° en meer. Het is

leuk om het verband na te gaan tussen het bedrag der schommelingen en de verschijnselen van zeeziekte onder de passagiers! Men merkt dat schommelingen, die de eerste dagen erg hinderlijk waren, tegen het einde der reis niet meer als onaangenaam worden gevoeld.

Hoe de beide bewegingen, stampen en slingeren, zich samenstellen, kan men het best waarnemen door op een lichte nacht de beweging van de mast te volgen tussen de sterren. Hij beschrijft een ingewikkelde kromme, die de hellingen van het schip geheel en al weergeeft. Het slingeren overweegt als de wind dwars is, het stampen als hij van voren waait.

De nauwkeurigheid van het sturen kan men beoordelen door na te gaan hoeveel een stang of een mast zich schijnt te verplaatsen ten opzichte van de maan, de sterren, of verre wolken; daarbij moet men zelf natuurlijk geheel onbewegelijk ten opzichte van het schip blijven. Men ziet dan hoe het schip nu eens iets meer naar rechts, dan naar links afwijkt (§ 67).

Bij flinke deining heeft het schip een sterke neiging om heen en weer te zwaaien, zijn koers wordt zeer onvast en het maakt een eigenaardige kwispelbeweging die de volle aandacht van den roerganger vereist; dit is vooral zo wanneer de deining schuin van achteren komt. In een golfberg bewegen namelijk de waterdeeltjes vooruit, in een golfdal achteruit; telkens als de voorsteven zich in een achterwaarts stromende watermassa bevindt, de achtersteven in een voorwaartse, zal de toestand sterk labiel zijn en het schip de neiging hebben dwars op de deining te gaan staan. Daar komt bij dat het roer sterker of minder sterk werkt, al naar gelang het zich in meebewegend of tegenstromend water bevindt.

69. Het slingeren van het schip.

We onderzoeken nu meer in het bijzonder het slingeren, om de gedachten te bepalen; maar onze waarnemingen zijn even goed toepasselijk op het stampen.

Het onderzoek van het slingeren moet eigenlijk in rustig water beginnen. Met een roeiboot is het heel eenvoudig *de eigen periode* van de slingerbeweging te bepalen: men gaat rechtop in de boot staan, buigt zich afwisselend een weinig naar rechts en naar links, voelt gemakkelijk in welk tempo men dit doen moet om de beweging te versterken, en bepaalt de duur van een twintigtal slingeringen. Hieruit volgt dan de duur van één enkele slingering. Bij een schip laat men de hele bemanning op kommando

tegelijk van de ene zijde van het dek naar de andere rennen, en dan weer terug, en dan nog eens: ik heb het nooit geprobeerd, 't moet een grappige vertoning zijn![1)]

Het is interessant na te gaan hoe de slingertijd van de amplitude afhangt. Al naar gelang van de vorm van de kiel zal hij bij toenemende amplitude toe- of afnemen.[2)]

Een zeer kenmerkende eigenschap van een schip is de wijze waarop een slingering uitdempt. Men brengt het schip aan het slingeren, en bepaalt de reeks achtereenvolgende uitwijkingen, door nauwkeurig opnemen van de horizonlijn (§ 68). Noem die hellingen φ_1, φ_2, φ_3 .... en hun verschillen $\Delta\varphi_{12}$, $\Delta\varphi_{23}$, ... Meestal is $\Delta\varphi = A + B\varphi^2$; de coëfficiënten A en B zijn kenmerkend voor elk schip. Ongelukkig is zulk een proef op een roeibootje weinig nauwkeurig, en op een groter schip voor een passagier niet uitvoerbaar.

De periode voor het stampen is meestal slechts de helft van die voor het slingeren, daar het terugdrijvende koppel zoveel groter is.

De vraag is nu wat er gebeurt als een boot of schip in volle zee komen, waar de golven er onregelmatig tegen beuken: er is dus nu ‘een uitwendige kracht die op een stelsel met eigen trillingstijd inwerkt.’ - Als de golven streng periodiek aan kwamen deinen, zou de invloed van de eigen trillingstijd van het schip weldra verdwijnen, en het zou uitsluitend in het tempo van de golfslag slingeren; hoe meer deze periode in de buurt ligt van zijn eigen trillingstijd, hoe groter de amplitude waarmee het schip slingert. Stel u nu echter voor dat de golven *slechts één enkele stoot* geven, dan een tijd lang niets, dan weer een stoot, enz. telkens met onregelmatige tussenruimten; het is duidelijk dat het schip dan telkens zal uittrillen met zijn eigen trillingstijd. In werkelijkheid geldt *een tussengeval*, want de golven komen op de meest onverwachte en grillige wijze aangestormd. Meestal kan men wel groepjes van 3 of 4 duidelijke slingeringen onderscheiden, waarvan men de duur bepalen kan, dan ineens volgt een ogenblik van twijfel en verwarring, en dan schommelt het schip weer even regelmatig; bij zeer verschillend weer, in verschillende oceanen (dus bij verschillend lange deining), altijd vindt u ongeveer dezelfde slingertijd. Blijkbaar is dat wel de eigen periode van het schip; groepjes golven die met een andere periode komen aanzetten geven het schip slechts

1) Over de invloed van het omringende water, dat mee in beweging komt, op de trillingstijd: zie Ingen. Arch. **4**, 103, 1933.

2) Duhil de Bénazé en P. Risbec, C.R. **76**, 1466.

een zeer geringe beweging. In het algemeen is de eigen slingering van het schip langzamer dan de periode der golven. Als het echter met wind en deining mee vaart, wordt de periode waarin de deiningsgolven het bereiken zoveel vergroot, dat het schip soms in resonantie komt en sterk gaat slingeren.

De eigenaardigheden der slingerbeweging zijn bij elk schip weer anders, al naar gelang van de vorm van de kiel, de verdeling der massa's, de bemasting, enz. Er zijn in dit opzicht evenmin twee gelijke schepen als men ooit twee mensen met gelijk karakter ontmoet. Onbewust beoordeelt de zeeman meer het geheel dan de afzonderlijke elementen. - Let echter toch op de volgende kenmerken:

hoe groot is de amplitude der maximale slingerbeweging bij zwaar weer?

hoe groot is de amplitude der gemiddelde slingerbeweging in normale omstandigheden?

hoe lang is de periode der slingerbeweging?

is de terugkeer tot de evenwichtsstand abnormaal snel vergeleken met de tijd die nodig was voor de uitwijking?

doet een windvlaag het schip sterk overhellen? (vooral van belang bij een zeilschip). Is het schip ‘rank’ of ‘stijf’?

De meting van *de absolute slingerbeweging* door het turen naar de gezichteinder is in § 68 uiteengezet. We zullen nu een toestelletje beschrijven om *de relatieve slingerbeweging* te onderzoeken: dit is de slingerbeweging van het schip ten opzichte van het wateroppervlak waarop het op elk gegeven ogenblik drijft. Wanneer het zich dus op de schuine helling van een golf bevindt en zich intijds onder dezelfde helling instelt, is er geen relatieve slingerbeweging; maar als het dat tengevolge van zijn traagheid niet intijds doet, of in andere gevallen nog meer helt dan de golf zelf, dan is die relatieve slingerbeweging er wel. Ons toestelletje is nu eenvoudig een zeer korte slinger, tenminste 10 maal sneller slingerend dan de golven, dus b.v. een slinger van 10 cm, die in ongeveer 0,6 sec heen en weer gaat. Hij moet zo dicht mogelijk bij de draaiingsas van het schip opgehangen zijn. Een dergelijke slinger geeft voortdurend de resultante aan van de zwaartekracht en van de traagheidskrachten die door de translatiebeweging van het schip ontstaan (versnellingen, vertragingen). Maar juist loodrecht op diezelfde resultante staat het oppervlak der watergolf: de kleine slinger geeft dus de richting aan van de normaal op de golf. Heeft men, toen het schip in rust was, de stand van de kleine slinger door een

merkteken aangegeven, dan zal de relatieve slingerbeweging zich documenteren door een afwijking van het slingertje.

Als de eigen slingertijd van het schip kleiner is dan √2 maal de periode van de golven, slingert het schip met grotere hellingen dan die van de golven; is zijn slingertijd groter, dan krijgt het kleinere hellingen. In het eerste geval gaat het door de vertikale stand *vóór* de golfberg of golfdal het bereikt, in het tweede geval gaat het *daarna* door die stand.

Met een heel lange slinger zou men de absolute slingerbeweging kunnen meten; hetzelfde dus, wat wij reeds in § 68 door waarneming van de kim hadden bereikt. Een slinger die een slingertijd van 60 sekunden heeft, is bijvoorbeeld al zo langzaam dat de golven hem niet in beweging brengen, en hij dus altijd de ware loodlijn aanwijst. Maar zulk een slinger is niet met eenvoudige middelen te verwezenlijken.

Stromend water.[+]

Vurige vlammen, watervallen, zeegolven, met hun rusteloze bewegelijkheid, hebben voor den mens een voor de hand liggende, duidelijke gelijkenis met bedrijvigheid en **leven**, *ditmaal in de onbewerktuigde natuur. En daar ons oog zich bij voorkeur tot het levende aangetrokken voelt, is hier stellig de oorzaak gelegen van de merkwaardige, onbeschrijfelijke bekoring, welke deze eenvoudige natuurverschijnselen veroorzaken, en waardoor zij het oog onvergelijkelijk veel langer boeien dan een nog zo bekoorlijk en verheven tafereel, als dit onbewegelijk blijft.*
J.J. Oppel, Pogg. Ann. **99**, 540, 1856.

70. Indrukken bij een fontein.[1)]

'Kom, laat ons hier op de bank onder de bloeiende linden uitrusten. De heerlijke geur, de koele schaduw, de hoge fontein vlak vóór ons: alles nodigt er ons toe uit. Als ik de machtige, bijna armdikke straal beschouw die wel zes man hoog opstijgt, krijg ik de indruk dat hier een geheimzinnige kracht in 't spel is, die het water noodzaakt trots zijn gewicht op te stijgen. De aanblik van iets ongewoons wekt in ons steeds een verborgen verwondering, ook al kennen we de oorzaak zodra wij er nader over denken.

Wat gewoonlijk het eerst onze aandacht trekt, is de toenemende dikte van de opstijgende straal. Die ontstaat, doordat de waterdeeltjes voortdurend snelheid verliezen terwijl ze stijgen; en dat de stroom een des te breder baan nodig heeft naarmate hij langzamer beweegt, wil dezelfde watermassa per tijdseenheid door elke doorsnede gaan. Die toenemende dikte, die als 't ware van binnen uit komende groei, boeien onze fantasie en wekken de voorstelling van een inwendig leven.

\+ Voor veel der in dit hoofdstuk behandelde onderwerpen, zie b.v. H. Bouasse, Houle, rides, seiches et marées (Paris, 1924). - Vaughan Cornish, Waves of the Sea (London, 1910). - Vaughan Cornish, Ocean Waves and other geophysical Phenomena (London, 1934). - H. Thorade, Probleme der Wasserwellen (Hamburg, 1931). - Handbuch der Experimentalphysik, Bd. **4** (Leipzig 1930-32).

1) Verkort naar H.C. Oersted, Der Springbrunnen (Ges. Schr. **1**, 39; omstreeks 1840).

Velen zouden het geluid weg willen hebben van de ruisende druppels die het watervlak treffen; maar wie zich aan de natuurindruk in zijn geheel overgeeft, zal deze mening niet delen. Moesten de druppels geruisloos vallen, dan zouden ze in ons een gevoel van onbehagen wakker roepen, ongeveer als een lichaam zonder schaduw het zou doen.

Ik ben overtuigd dat de tuinkunstenaar deze bank met overleg juist hier heeft geplaatst. Als men zo dicht bij een fontein staat, dat men het plassen van het water te sterk hoort, dat men haar niet goed kan overzien, dat zij niet een aangenaam geheel met de omgeving maakt: dan is het alsof men een schilderij bij verkeerde belichting en in een storende omgeving zou zien.

Het komt mij vóór dat het licht dat van het neervallende water komt, zekere eigenaardigheden vertoont, en niet gelijkt op het schitteren van heldere glazen parels, noch op dat van een rustig wateroppervlak; het vertoont een merkwaardige fonkeling. Dit is te wijten aan de onophoudelijke beweging der druppels, maar ook aan twee andere omstandigheden: de voortdurende vormveranderingen van elke druppel tengevolge van de capillaire trillingen; en het feit dat er zowel zeer grote druppels zijn, als zeer kleine tussen de andere in.

Ik heb veel fonteinen gezien welke een heel ander karakter hadden dan deze hier, en die niet dezelfde stempel droegen van rust in de beweging. De zeer kleine maakten natuurlijk slechts een geringe indruk, zoals alle onbetekende dingen; ik kan mij zelfs voorstellen dat een al te onbeduidend fonteintje als een mislukte poging spot kan opwekken. Dan zijn er fonteinen die door een grote kracht gedreven worden in verhouding tot hun massa, zodat ze in veel kleine druppels verstoven worden; ze dragen dus een veel sterkere stempel van leven en beweging; ze bruisen en schuimen, en overweldigen ons als het ware met hun kracht, zodat ze mij goed schijnen te passen voor grote, volkrijke steden en zeer druk bezochte tuinen. Daarentegen schijnt deze dikkere en langzamer straal meer geschikt voor een rustiger omgeving. De grootste fontein die ik ooit gezien heb was (geloof ik) 181 voet hoog, en slechts zo dik als een gemiddeld ontwikkeld mensenlichaam; ze maakte geen geringe indruk, maar die indruk was van een andere soort: sterker en grootser, een schouwspel meer verheven dan harmonisch-bevredigend. De inwendige harmonie was niet bedorven, maar de indruk ervan werd verdrongen door het gevoel van kracht en grootsheid.'

71. Het balletje op de fontein.[1)]

In kermistenten, in oude tuinen ziet men soms een heel licht balletje van kurk of celluloid, dat op en neer danst op de straal van een fontein. Men kan zich voorstellen dat de kracht van

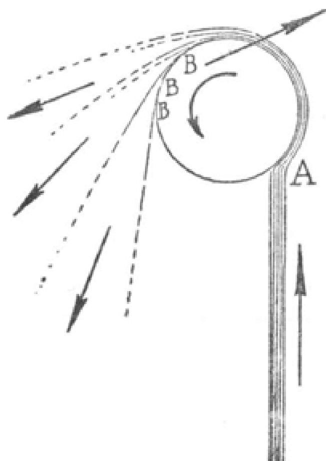


Fig. 56. Het draaiende balletje op de fontein.

de straal ruim voldoende is om het gewicht van het balletje op te heffen; maar geheel onbegrijpelijk lijkt het, dat het nooit opzij uitwijkt en van de straal af valt. De straal treft het balletje zelfs niet aan de onderkant, maar gewoonlijk een 45° daar vandaan. Klaarblijkelijk is dit een soort even wichtstoestand waar het omheen schommelt; wipt het per ongeluk iets te ver, dan valt het, maar zó dat het meestal nog wel in de straal terugkeert. Men beweert soms dat de waterstraal het balletje zwevende houdt doordat hij de omgevende lucht met zich meezuigt; maar het is een feit dat het verschijnsel zich net zo goed in 't luchtledige afspeelt.

We komen tot de juiste verkaring door op te merken dat het balletje voortdurend om zijn as tolt, blijkbaar door de schuine stoot van het water (fig. 56). Een gedeelte van de straal hecht zich aan het balletje door adhesie, wordt meegenomen door de snelle wenteling, en spat er slechts aan de achterkant af; hij oefent een vertikale opwaartse kracht uit in het punt A, maar ook een *reactiekracht* in de punten B, waar hij door de middelpuntvliedende kracht het balletje loslaat en wegspat. Die reactiekracht helpt het balletje zwevende houden, en zij is het die het telkens terug in de straal drijft. Ze blijft zelfs nog even werken als het balletje al niet meer aan de straal raakt, want er ligt dan toch nog een waterlaagje op dat nog moet wegspatten, en dat gedurende een breukdeel van een sekunde nog een merkbare reactiekracht levert. - Dat onze verklaring wel de juiste is, blijkt uit een eenvoudige proef: zodra men het balletje met een weinig vet inwrijft, valt het neer en kan niet meer zweven; de adhesie van het water is nu vervallen.

Naar gelang van de kracht van de straal kan het balletje op

1) O. Reynolds, Mem. lit. philos. Soc. Manchester **4**, 1869-70; Papers, **1**, 1. - W. Baker, Science, **64**, 161, 1926. - Het volledigst in E. Hagenbach, Ann. Phys. **159**, 497, 1876.

twee verschillende manieren zweven (fig. 57). *a*) Bij een zwakke straal blijft het in het gladde gedeelte van de straal; het zweeft afwisselend rechts, dan links, dan weer rechts enz. van de straal. De verklaring is, dat het nog om zijn as tolt op het ogenblik dat het over de evenwichtsstand heen schiet, zodat de kracht die nu in omgekeerde richting moest werken slechts in actie komt als het balletje al een vrij grote uitwijking gekregen heeft. Op deze

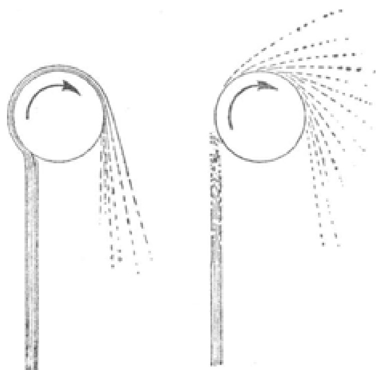


Fig. 57. Twee bewegingsvormen van het balletje op de fontein.

wijze wordt het heen en weer schommelen voortdurend onderhouden. *b*) Bij een sterkere straal stijgt het balletje tot in het gedeelte van de straal dat uit afzonderlijke druppels bestaat; de straal treft het verder van zijn onderste punt dan bij de vorige toestand, blijkbaar omdat de reactiekracht nu geringer zou zijn, als er niet een groter componente van benuttigd werd. Het balletje tolt snel om een horizontale as, maar draait daarenboven om de straal als vertikale as, nu eens rechtsom, dan linksom, volgens dat het toevallig een schuine stoot van het water krijgt.

Soms gelukt het door openen of sluiten van de kraan van de ene toestand naar de andere over te gaan zonder dat het balletje valt.

72. Profiel van een rivierbedding.

Ik moet bekennen dat ik jaren lang haast niets geweten heb van de vorm der bedding van de kanalen en rivieren in mijn omgeving. Toch is het zo eenvoudig om de diepgang te bepalen en het profiel van de doorsnede. We doen dit van op een brug of van uit een roeibootje; in dit laatste geval spannen we eerst een touw van oever tot oever, en bevestigen daaraan merktekens om de 5 m. Nu peilen we achtereenvolgens op verschillende afstanden van de oever; kleine diepten meten we met een peilstok, een willekeurige lat waarop we een ruwe schaalverdeling hebben getekend; grotere diepten met een touw waaraan een flink gewicht hangt. Het dwarsprofiel kan nu op verkleinde schaal getekend worden.

De grootste diepgang vinden we in onze gewesten bij het Noordzeekanaal (14 m).

Lees dagelijks de waterstand van een rivier af op een der peilschalen die men bij bruggen en elders aangebracht vindt. Maak een grafische voorstelling! Hoe valt het peil als er een lange periode van droogte optreedt?

73. De stroomsnelheid van een rivier met de vlottermethode.

Men kan de stroomsnelheid schatten uit de snelheid van

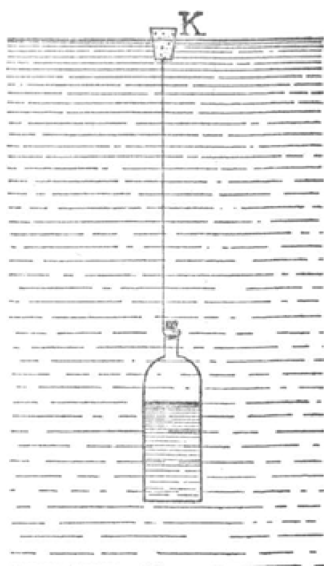


Fig. 58. Vlotter voor de bepaling der stroomsnelheid van een rivier.

takjes, enz. die op het oppervlak drijven. Weldra zal men echter bemerken dat daarbij grote vergissingen kunnen ontstaan, omdat de wind te veel invloed heeft. Daarenboven zou men op die manier nooit de snelheid op verschillende diepten kunnen bepalen.

De volgende werkwijze is eenvoudig en nauwkeurig. Neem een flesje van 50 of 100 cm^3, vul het gedeeltelijk met water en zet er een kurk op. Beproef eerst de hoeveelheid water zó te regelen dat het flesje in het water *zweeft*: dat mislukt, het flesje zinkt of stijgt altijd! Bevestig echter aan de hals een dunne ijzerdraad, en daaraan weer een kurkje *K* (fig. 58); nu is het gemakkelijk het flesje zó te vullen dat dit kurkje net even boven het oppervlak komt: het evenwicht is nu stabiel (waarom?). - Laat het flesje ergens midden in een rivier los: statig drijft onze vlotter met de stroom mee. Zijn snelheid is die van de laag waarin zich het flesje bevindt, want de weerstand van het kurkje tegen wind of stroom is te verwaarlozen.

Bepaal op die wijze de snelheid op verschillende afstanden van de oevers en op verschillende diepten. Is er geen brug, dan doet u het best een touw van oever tot oever te spannen, zoals uitgelegd is in § 72; een helper staat in een roeiboot bij het touw, een andere 50 m stroomafwaarts. De waarnemer die de tijd bepaalt loopt langs de oever met de drijver mee. Als u genoeg metingen heeft kunt u een doorsnee der rivier op schaal tekenen, en daarin krommen van gelijke stroomsnelheid trekken (fig. 59). De snelheid is in 't algemeen het grootst in het midden van de

rivier[1]; misschien is zij nog iets groter op 10 tot 30 cm diepte dan aan het eigenlijke oppervlak. Hiermee zou samenhangen dat

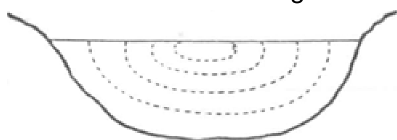


Fig. 59. Doorsnede van een rivierbedding; gestippeld: de lijnen van constante stroomsnelheid.

drijvende voorwerpen die tot een geringe diepte in het water dompelen, de gemiddelde snelheid aannemen van al de lagen waarin zij zich bevinden, en dus sneller stroomafwaarts bewegen dan het water aan de oppervlakte. De lijn van grootste stroomsnelheid heet de *stroomdraad* of *verhangdraad*. Nabij de bodem en langs de oevers is de snelheid geringer door de wrijving tegen de vaste wanden; die invloed neemt geleidelijk naar het midden der rivier af.

Bepaal eens de gemiddelde snelheid voor alle punten die vertikaal onder elkaar liggen met *de staaf van Cabeo*: een eenvoudige houten lat, aan het ondereind omwikkeld met ijzerdraad of bezwaard met lood zó dat zij stabiel vertikaal drijft;

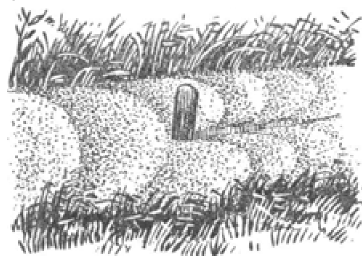


Fig. 60. Eendekroos op een langzaam stromend beekje.

het bezwarende gewicht is van de orde van de helft van het gewicht van de lat. Deze moet voldoende lang zijn om tot niet ver van de bodem in te zinken, veiligheidshalve echter 50 cm er van afblijven. Merk op hoe de staaf als ze drijft schuin voorover helt, en aldus laat zien dat de snelheid boven groter is dan beneden.

Dat de stroomsnelheid in 't midden groter is dan aan de randen, is dikwijls zonder enige meting mooi waar te nemen aan het eendenkroos dat op een sloot drijft; of aan afgevallen wilgeblaadjes die zich in bogen rangschikken. De invloed van een paal is bijzonder duidelijk (fig. 60).

Als er in een beek groenwieren voorkomen, die aan rietstengels en andere ondergedompelde voorwerpen hangen, kan men zien hoe ze als evenveel windvaantjes overal de stromingsrichtingen aanwijzen: 't lijkt wel een kaart van de zeestromingen! Vooral waar de stroom zich splitst is het beeld zeer fraai.

Langs de straatweg die over de Wageningse berg loopt, liggen

1) Bij een bocht, meer aan de buitenkant.

lange, open rioleringen. Het was merkwaardig om de felle waterstroom na te gaan die zich daarin gevormd had na een zware regenbui. Vooreerst zag men hoe van beide zijwanden een stelsel schuine strepen uitging, dat we nog verder zullen beschrijven (§ 89, fig. 85). Maar daarenboven kon men opmerken hoe schuimbellen, die zich gevormd hadden, precies in de middendraad bewogen, keurig op een rijtje, over de gehele lengte van het kanaal. Blijkbaar was daar de stroming het sterkst, en werden de bellen vanzelf daar naartoe gezogen.

74. De buis van Pitot.

Het is een eenvoudige glazen buis, rechthoekig omgebogen en aan een uiteinde lichtelijk vernauwd. Ze wordt in de rivier gehouden

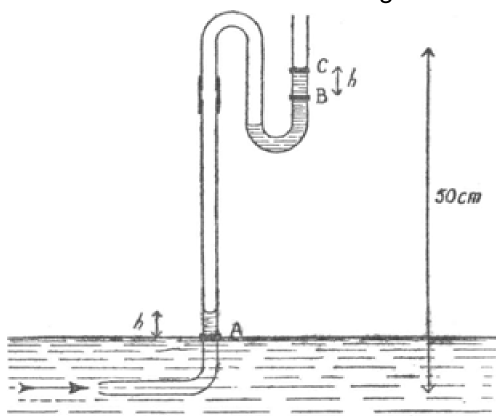


Fig. 61. Het bepalen der stroomsnelheid met de buis van Pitot.

op de wijze die fig. 61 aangeeft. Het aankomende water stijgt door zijn vaart een eindje *h* in de glazen buis, net zo lang tot de kinetische energie van het stromende water geheel is overgegaan in potentiële energie van de vloeistofzuil(vergelijkmet een opwaarts geworpen steen!) De evenwichtsvoorwaarde is dus: $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$, of $v = \sqrt{2gh}$.

De aflezing van het hoogteverschil *h*, tot hetwelk het water gestegen is boven het normale peil, kan vrij goed met behulp van een spiegeltje geschieden, dat half in het water dompelt, onder een helling van 45°. Iets gemakkelijker werken we, wanneer we de Pitot-buis met een eindje gummislang verbinden aan een omgebogen glazen buisje, dat als manometer dient: in de U-vormige bocht brengen we een weinig water, en we zien hoe dit vloeistofzuiltje zich verplaatst zodra de Pitot-buis in het water wordt gehouden. Drie gummiringetjes worden over de glazen buis geschoven; het eerste (A) dient om nauwkeurig aan te geven hoe diep we de buis in het stromende water dompelen, zodat dit

steeds op dezelfde wijze geschiedt; het tweede (B) geeft het peil in de manometer aan, als de Pitot-buis in rustend water wordt gehouden; het derde (C) geeft het peil aan, als men de buis in de stromende vloeistof tegen de stroom in keert. Men vindt voortdurende kleine wisselingen in de stijghoogte, tengevolge van het onregelmatige stromen der rivier; het is zaak, de ringetjes B en C zo goed mogelijk op het gemiddelde peil in te stellen.

De meting der stroomsnelheid met ons eenvoudige toestelletje is zeer vlug uit te voeren, maar zij wordt slechts voldoende nauwkeurig bij snelheden van tenminste 50 cm/sec; *h* is dan 12 mm. Vergelijk uw meetresultaat met dat, uit de vlottermethode verkregen.

Op deze wijze bepaalde Pitot in 1723 de snelheid van de Seine onder de Pont Royal te Parijs. De Pitot-buis is nog steeds een der meestgebruikte instrumenten voor de bestudering van vloeistof- of gasstromen. De juiste bepaling van de ongestoorde, statische druk is één der grote moeilijkheden die men daarbij te overwinnen heeft.

75. Waterafvoer van een rivier.[1)]

1. Om te schatten hoeveel water per sekunde door een rivier vervoerd wordt, is het voldoende de snelheid even onder het oppervlak op enkele punten van de bedding te bepalen, en daarvan het gemiddelde V_0 te nemen; men kiest de punten nooit te dicht bij de oevers. De gemiddelde snelheid over de gehele doorsnede der rivier is dan volgens de ervaring ongeveer: $V = 0{,}86\ V_0$. Vermenigvuldigt men die snelheid met het oppervlak van de doorsnede, dan vindt men de hoeveelheid water die per sekunde voorbijstroomt; men drukt die altijd uit in m^3 per sekunde.

Nog eenvoudiger is het, alleen de maximale snelheid te bepalen die even onder het oppervlak optreedt; in een recht stuk der rivier treft men die natuurlijk in het midden aan. De verhouding

$$\frac{\text{gemiddelde snelheid}}{\text{grootste oppervlaktesnelheid}}$$

hangt af van de aard der bedding, en bedraagt volgens de ervaring:

0,51	grint met gras en riet;	0,74	leem en zand;
0,69	grint;	0,81	hout, beton.

In de praktijk neme men voor ons land 0,7.

Tenslotte kan men de gemiddelde diepte *H* van de rivier door peiling bepalen, en dan de snelheid meten op een diepte

1) B.J. Kerkhof, Practische Hydrometrie (Amsterdam, Ahrend).

0,62 *H*: de snelheid die men daar aantreft is de gemiddelde snelheid *V* van de rivier.

2. Andere empirische formules geven schattingen van de gemiddelde snelheid en dus van het watertransport zonder dat rechtstreekse metingen nodig zijn. Een der meest bekende luidt:
$V = c\sqrt{RJ}$.
Hierin betekenen:
J = het verhang van de rivier, af te lezen van een stafkaart met hoogtelijnen: men deelt het hoogteverschil tussen twee punten door hun afstand, langs de rivier gemeten. Zo bedraagt het verhang van de Rijn:

Emmerik - Nijmegen	12,0 cm/km	Bommel - Gorkum	8,6
Nijmegen - Bommel	10,8	Gorkum - Moerdijk	5,0

Men ziet dat het in 't algemeen afneemt, naarmate men de monding nadert.

$$R = \frac{\text{natte omtrek}}{\text{oppervlak van het dwarsprofiel}}$$
;
deze ‘natte omtrek’ is de omtrek van het deel der beddingdoorsnede waar water aan grond raakt. Bij ondiepe wateren is *R* ongeveer gelijk aan de gemiddelde diepte.
c, een empirische constante, is een maat voor de *gladheid* der wanden; zij bedraagt:

voor rivieren tussen stenen muren	80
voor kanalen	51
voor rivieren tussen aarden oevers	40
voor rivieren met veel klei	30.

Deze waarden gelden slechts als *R* gerekend wordt in meters, *V* in meters per sekunde; *J* is natuurlijk een onbenoemde breuk (bv. meters per meter).
Andere formules gelden alleen voor natuurlijke wateren:

$V = 44R^{2/3}J^{1/2}$.
$V = 25(1 + 0{,}5\sqrt{R})\sqrt{RJ}$

{ $V = 31HJ^{1/2}$ ... $H < 1{,}50$ m
{ $V = 34H^{3/4}J^{1/2}$... $1{,}50 \text{ m} < H < 6$ m
Hierin is *H* de gemiddelde diepte van de bedding.

Bepaal volgens die verschillende formules en methoden het watertransport van een rivier en vergelijk de uitkomsten onderling!
Zoek een punt waar twee rivieren samenvloeien; bepaal het watertransport van elk, en zie of het watertransport van het geheel gelijk is aan de som van dat der twee delen (Continuïteitsbeginsel der hydrodynamica!)
Men zou kunnen beproeven de snelheid van het water in een rivier te

vergelijken met de snelheid die het onder een brug heeft, waar de doorsnede van de bedding geringer is. Het is de vraag of de onregelmatige wervelingen het verkrijgen van goede uitkomsten niet zullen bemoeilijken.
Onderzoek hoe het watertransport afhangt van de hoogte van de waterspiegel. Als het peil stijgt blijft het verhang hetzelfde, maar de wrijving tegen de wanden neemt af.

3. Sommige rivieren zijn afgedamd; het waterpeil stijgt dan, tot er evenveel over de stuw stroomt als wat de rivier aanvoert. Stel *b* de breedte der rivier, h de afstand van de vloeistofspiegel benedenwaarts gemeten (fig. 53). Volgens de wet van Torricelli is op een diepte h de uitstroomsnelheid $\sqrt{2gh}$; door een strook op deze diepte, dh hoog en *b* breed, gaat er per sekunde $b\sqrt{2gh}\,dh$; door de gehele doorsnede van totale diepte *h* gaat er $\int_0^h b\sqrt{2gh}\,dh = \frac{2}{3}hb\sqrt{2gh}$. Ongelukkig moet er alweer een empirische correctiefaktor bij, voor wervelvorming enz., zoals dat zo dikwijls in de leer der

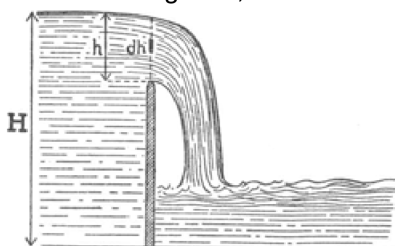


Fig. 62. Profiel van een rivier bij een stuw.

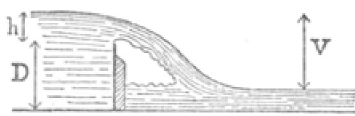
stromende vloeistoffen het geval is! Die faktor is ongeveer 0,60 voor een stuw ‘met vrije straal’ (§ 76). Tenslotte wordt dus het watertransport:
$0{,}40\ bh\sqrt{2gh}$.
De hoogte *h* van de waterspiegel boven de stuw is dus een rechtstreekse aanwijzing voor het watertransport.

Zoek in uw streek een afgedamde rivier en vergelijk de uitkomst dezer methode met de vorige! Bij een grote stuw vrage men de hoogte *h* aan den wachter. Grote stuwen komen voor te Borgharen, Linne, Roermond, Belfeld, Sambeek, Grave, Lith.

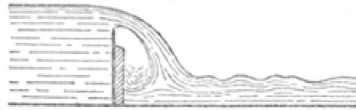
76. Uitstromingsvormen bij een stuw.[1)]

De hoogte van de opgestuwde waterspiegel boven de dam noemen we *h*; die hangt af van het watertransport (§ 75). Het verschil van hoogte der waterspiegels vóór en na de dam noemen we *V*; dit hangt enerzijds af van het watertransport, anderzijds van het verval en de weerstand stroomafwaarts. Stel nog *D* de hoogte van de dam.
De volgende schone verscheidenheid van uitstromingsvormen kan nu voorkomen (fig. 63).

1) Enz. d. mathem. Wiss. IV.



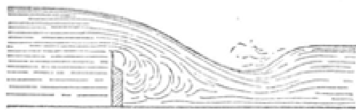
Vrije straal, ontstaat als de zijwanden openingen hebben die voldoende lucht onder de straal toelaten. Bij de volgende uitstromingsvormen zijn de zijwanden dicht.



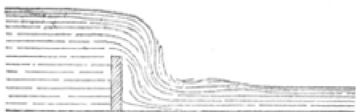
Samengedrukte straal; $h < \frac{2}{5}D$. Onder de straal is de lucht verdund.



Gevulde straal; $h > \frac{2}{5}D$; $V > \frac{1}{4}D$. De ruimte onder de straal is met wervelend water gevuld.



Duikstraal; $h > \frac{2}{3}D$; $V < \frac{3}{4}D$. Bemerk dat de plaats waar het normale peil zich stroomafwaarts herstelt, dichter bij de stuw gekomen is.



Adhererende straal. Komt voor als de dam nogal dik is. Het watertransport is merkbaar groter dan het normale.



Onvolkomen straal; $V < h$.



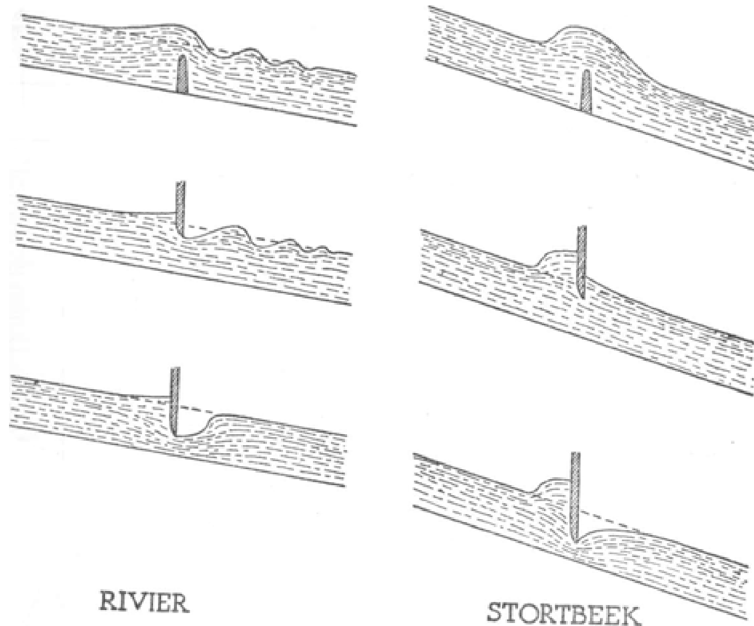
Golvende straal; $V \ll h$.

Fig. 63. Uitstromingsvormen bij een stuw.

77. Rivier of stortbeek.

Deze onderscheiding is geen kwestie van letterkundige smaak, maar heeft een scherpe wetenschappelijke betekenis! Bij een *rivier* is het verval van de bodem kleiner dan g / c^2; bij een *stortbeek* is het verval groter dan g / c^2.

De grootheid c is onze constante voor de gladheid der wanden,



Rig. 64. Verschil tussen de stuwingsvormen bij een rivier en bij een stortbeek.

die 30 tot 80 bedraagt (§ 75). Het 'kritische verval' is dus van de orde 0,4%.

Echte stortbeken hebben we in ons land niet veel, maar na een zware regenbui kunnen wij er zien ontstaan, waar de regen afgevoerd wordt door de tramrails, door de greppels van hellende straten. Bij watermolens, bij fabrieken vinden we soms open waterleidingen met een flinke helling.

Om uit te maken of men met een rivier of met een stortbeek

te maken heeft, is het al voldoende een plank dwars op de stroom in het water te houden; ze mag niet àl te kort zijn, anders zouden de wervels aan de uiteinden de waarneming hinderen. Al naarmate we die plank slechts een weinig in het water dompelen, of dieper, of ze helemaal onder water houden, ontstaan typisch verschillende stuwingsvormen, afgebeeld in fig. 64.

Waarvandaan komt nu dat merkwaardige verschil, waarom is g / c^2 juist die kritische grens? Wel als het verval van de grond

$$J = \frac{g}{c^2}$$

is, is de stroomsnelhied (volgens § 75):

$$c\sqrt{R\frac{g}{c^2}} \text{ of } \sqrt{gR}$$

; en voor niet te diep water is R niet zeer verschillend van de diepte H. Zodat het erom gaat of de snelheid van het water kleiner of groter is dan $\sqrt{gH}$. Maar dit is juist *de snelheid van de snelste golf die in een rivier van diepte H kan ontstaan* (§§ 91, 100). Ons kritisch verval is dus eenvoudig hierdoor bepaald: bij een rivier lopen de golven sneller dan het water; bij een stortbeek, langzamer. Daarom kan de plank geen echte golven vormen in een stortbeek: zij verwekt slechts een ‘enkelvoudige golf’ (§ 100).

78. Het ontstaan van waterwervels.

Een snelvlietende beek in de Veluwe. Zomerzon schijnt door het klare ondiepe water op de heldere zandbodem. Alle stromingen

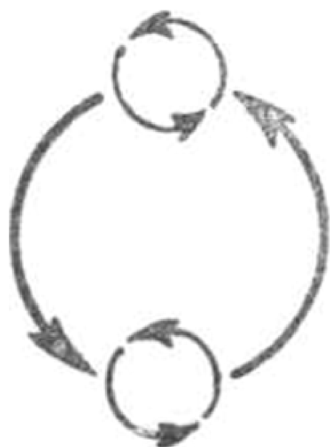


Fig. 65. Beweging van twee waterwerveltjes om elkaar.

tekenen zich prachtig op de bodem af als lichte of donkere patronen, blijkbaar doordat ze kleine verhevenheden of uithollingen van het wateroppervlak veroorzaken. Voortdurend vormen zich werveltjes, ieder daarvan geeft een donker schaduwvlekje van enkele centimeters middellijn, omgeven door een lichte ring[1)]. Vele heel zwakke werveltjes worden aldus zichtbaar, waarvan men anders niets gemerkt zou hebben. Men kan mooi zien hoe verrassend lang ze blijven bestaan, en hoe ze om elkaar draaien volgens de wetten der hydrodynamica (fig. 65).

Dompelt men een plankje in de beek, loodrecht op de stroomrichting, dan ziet men op het schaduwbeeld hoe zich daarachter een dubbele wervel vormt; beide verenigen zich in het midden tot een ‘terugstroom’, die het plankje van achteren’ treft (fig. 66).

1) Vgl. Science, **72**. 478, 1930.

Belangrijk is ook het beeld dat ontstaat als men het plankje schuin op de stroomrichting houdt (fig. 66). De aankomende stroom splitst zich asymmetrisch, het verdelingspunt ligt altijd

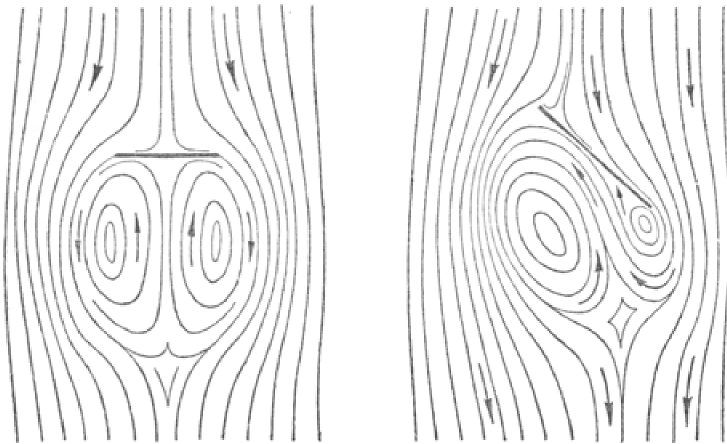


Fig. 66. Wervels achter een plankje.

dichter naar de voorste rand toe. Achter die vóórrand vormt zich een grote wervel, die stationair blijft ten opzichte van

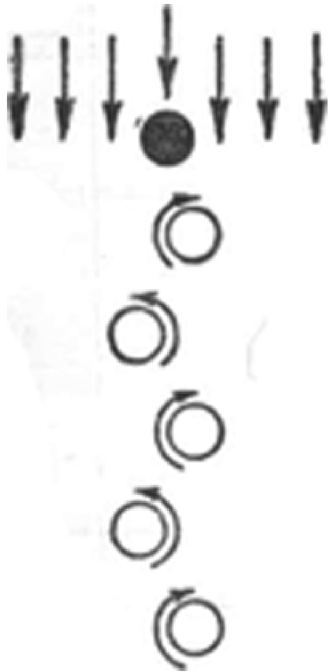


Fig. 67. Wervelweg volgens von Kármàn.

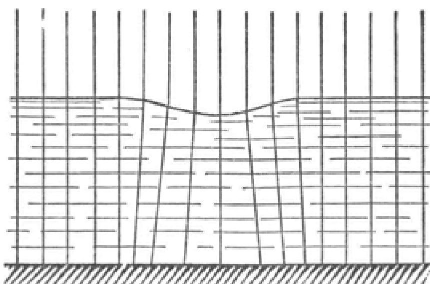


Fig. 68. Breking van het licht door een waterwerveltje.

het plankje; meer naar achteren toe, aan de lijzijde, ontstaan er kleine werveltjes, telkens loslatend en wegdrijvend, terwijl nieuwe ervoor in de plaats komen. De terugstroom treft nu het plankje even ver van de achterrand als het verdelingspunt aan de

loefzijde verwijderd was van de vóórrand. - Dit stroomlijnenbeeld geeft een prachtig model van de vloeistofbeweging om een gierpont; het is ook het beeld dat we leerden kennen toen we de windstroming om het zeil van een zeilboot onderzochten (§ 65).

Achter een potlood dat ik vertikaal in het water houd, ontstaan de wervels afwisselend aan de linker- en aan de rechterzijde, telkens loslatend en door nieuwgevormde vervangen, samen een beroemde stromingsfiguur vormend: *de wervelweg van Von Kármàn* (fig. 67) (vgl. II, § 51).

Het tot stand komen van het schaduwbeeld der wervels is gemakkelijk te verklaren uit de breking der lichtstralen aan het wateroppervlak (fig. 68). Waar het oppervlak hol is, wordt de lichtbundel uitgespreid en vormt zich schaduw; waar het bol is, worden de stralen verzameld en zien we een grotere helderheid.

Op andere plaatsen kan men de waterwerveltjes beter in

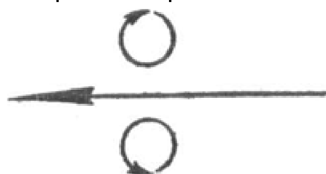


Fig. 69. Vorming van waterwervels aan de beide kanten van een roeispaan.

teruggekaatst licht waarnemen, als men bijvoorbeeld op die plaats de grenslijn weerspiegeld kan zien tussen een donker gebouw, een brug, een boomkruin, en de heldere hemel. De kleine uithollingen van het oppervlak boven elk werveltje tekenen zich dan helder af tegen donkere grond, of omgekeerd. Overal waar een rivier plotseling vernauwt of waar een bruggehoofd vooruitsteekt kan men ze zien ontstaan. Achter een uitstekend takje van een waterplant vormt zich ook alweer een wervelweg.

Merk bij het roeien op, hoe elke roeispaan telkens bij een riemslag twee werveltjes in het water maakt, die tegengesteld draaien, en die soms in hun centrum een verscheidene centimeters diepe uitholling van het wateroppervlak vertonen (fig. 69).

Op grote schaal vormt zich een wervel achter elk der kribben van onze rivieren (fig. 70).

De waterwervels die we hebben waargenomen leren ons een geheel andere bewegingswijze van het water kennen dan die welke we gewoonlijk aan een stromende vloeistof toeschrijven. Hoe meer men de beweging der vloeistoffen bestudeert, hoe meer men doordrongen wordt van het fundamentele verschil tussen:

a) *de laminaire stroming*, waarbij de vloeistofdeeltjes zich

ogenschijnlijk alle evenwijdig aan dezelfde richting bewegen (al is het niet uitgesloten, dat er een ‘mikroskopische’ werveling plaats vindt);

b) *de turbulente stroming*, waarbij duidelijk zichtbare onregelmatige wervelingen optreden.

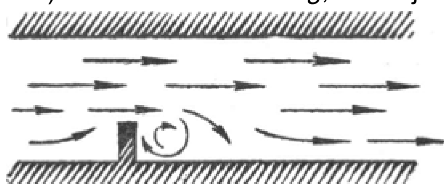


Fig. 70. Vorming van grote wervels achter de kribben ener rivier.

Osborn Reynolds, die het grote belang van dit onderscheid het eerst in het licht stelde, heeft theoretisch aangetoond dat elke vloeistof die enige viskositeit bezit stabiel laminair zou stromen, als de invloed van de wanden er niet was. Die zijn het die wervels doen ontstaan, en die de stroming in een turbulente omzetten[1)].

In wervelend water is de weerstand van een schip altijd groter dan wanneer de waterdeeltjes in evenwijdige banen stromen. Elk zeiler weet, hoeveel moeilijker hij vooruitkomt in het kielzog van een tegenstrever, niet alleen omdat die hem de wind uit de zeilen neemt, maar ook omdat de waterweerstand groter is geworden. Met ruim 50% kan de weerstand door deze oorzaak toenemen.

79. Draaiingszin van de waterwervels in een rivier.[2)]

Er is een heel merkwaardige theorie betreffende de draaiingszin van de waterwervels die in snelstromende rivieren ontstaan. De grote meerderheid daarvan zou *tegengesteld aan het uurwerk* draaien, net zoals de barometrische depressies! En dit zou zelfs voor 90% der wervels het geval zijn! Men neemt voor de statistiek liefst de goed gevormde wervels, en telt die niet mee welke veroorzaakt zijn door brugpijlers, grote rotsblokken enz.; u voelt dat er hier een groot gevaar schuilt, en dat de waarnemer moeilijk zal kunnen vermijden een partijdige keuze te doen,

De oorzaak van die voorkeursrichting zou men moeten zoeken in de aswenteling der aarde: het is welbekend dat deze aanleiding

1) Reynolds steunde daarbij op een merkwaardige waarneming in 't vrije veld; vgl. Philos. Trans. 1883; Papers, **2**, 58. - Proc. R. Inst. **35**, 84, 1885.
2) J. Brunhes, C.R. **138**, 915, 1904.

geeft tot *de versnelling van Coriolis*, waardoor bewegende lichamen op het noordelijk halfrond naar rechts afwijken; uit

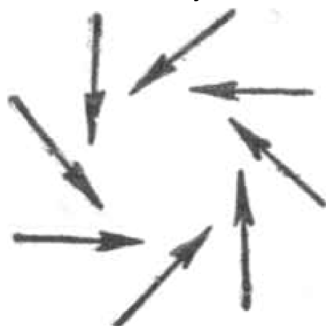


Fig. 71. Het ontstaan van wervels door de versnelling van Coriolis.

fig. 71 kan men zien dat de waterdeeltjes die naar het drukminimum van de wervel toestromen aldus een wervelende beweging krijgen. Het zou dus voldoende zijn een blik te werpen op een snelvlietende rivier, een bergstroom bijvoorbeeld, om een proefondervindelijk bewijs van de draaiing der aarde te verkrijgen!

Jammer genoeg leert een kleine berekening, dat de krachten van Coriolis zeer gering zijn, en het schijnt wel zeker dat zij in het beschouwde geval geen praktische betekenis hebben. Vermoedelijk is het schijnbare overheersen van een bepaalde draaiingsrichting niets anders dan zelfbedrog; men zou eens kunnen nagaan, of de draaiingsrichting omgekeerd wordt gevonden in het zuidelijk halfrond.

80. Vloeistofweerstand. Stroomlijnvorm.

Wanneer men een lichaam door het water sleept, voelt men een weerstand, die ten dele ontstaat door wrijving van het water tegen het lichaamsoppervlak, ten dele door de golven die zich achter het gesleepte lichaam uitbreiden. Men zou kunnen menen, dat althans deze laatste weerstand bepaald wordt door de doorsnede van het lichaam, dwars op de voortbewegingsrichting.



Fig. 72. Luchtweerstand van verschillend gevormde lichamen met gelijke dwarse doorsnede.

Niets is minder waar! Voor 6 omwentelingslichamen van gelijk dwarsoppervlak, in fig. 72 voorgesteld, lopen de weerstanden uiteen van 8 tot 126!

Onder deze vormen is *de stroomlijnvorm* verreweg de gunstigste: het is een soort visvorm, die met het dikste uiteinde *stroomopwaarts* gericht moet worden. Het gaat er dus niet om, dat de aankomende waterstroomstralen geleidelijk opengebogen worden; veel belangrijker is, dat de wervelvorming aan de achterzijde zoveel mogelijk vermeden wordt. - Een enkele maal

vertoont de natuur zelf ons het model van een dergelijk stroomlijnenlichaam. Het komt vóór, dat een ijsschots blijft vastzitten aan de bodem van een rivier, en dat ze langzamerhand door het voorbijstromende water bijgelikt en gefatsoeneerd wordt, tot ze de vorm van kleinste weerstand heeft bereikt: men krijgt dan prachtige visvormen. - Of een zandbank wordt op dergelijke wijze door de stroming vervormd. - Of een hoop zand of sneeuw, om een heggetje verzameld, eindigt met de visvorm aan te nemen (§ 120). - De vissen zelf, de kikkervisjes, de walvissen en tal van andere waterdieren vertonen de stroomlijnvorm, als prachtige aanpassing aan het leven in het water.

81. Ebbe en vloed.[1)]

Het water van de zee, tweemaal daags rijzend en tweemaal daags terugwijkend, vertoont ons een groots en indrukwekkend schouwspel. Het leven aan het strand is voor een goed gedeelte door de wisseling van eb en vloed bepaald, en vanzelf komt de wens bij ons op, die waterbeweging nauwkeuriger te onderzoeken. Het is mogelijk dat dit het best zal gelukken van op een pier; of in een haven, waar de golfslag uitgedempt is en

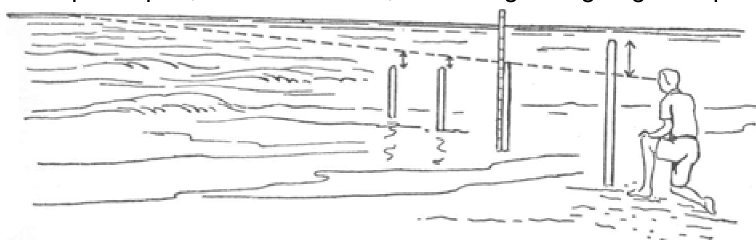


Fig. 73. Het bepalen lan het peil der zee, voor het onderzoek van ebbe en vloed.

men allicht bij een brug of bij een sluis peilschalen zal aantreffen. Maar te Zandvoort, waar ik gelegenheid had enkele eenvoudige waarnemingen uit te voeren, was ik niet in zulke bijzonder gunstige omstandigheden; en vermoedelijk zal dit evenmin het geval zijn voor de meeste lezers, die dus wellicht willen horen hoe men zich gewoon aan 't strand behelpen kan (fig. 73).

1) Zie het aardige maar verouderde populaire boek: Time and Tide, door R.S. Ball (London 1889). - F. Hopper, Hdb. d. Experimentalphysik, XXV, 687, 1931. - H. Thorade, Ebbe und Flut (Hamburg, 1941).

Hoe rustiger de zee, hoe beter. We verschaffen ons een stokje van 1-2 m lengte (gordijnrol), en zetten daar grove, duidelijke strepen op, met afstanden van 10 cm; de 5 cm-streepjes worden lichter aangegeven. Nu maken we gebruik van de rijen paaltjes, die aan de meeste badplaatsen het strand in verschillende stukken onderverdelen[1]. We kiezen het laatste paaltje dat met zijn voet nog aanhoudend in het water staat, op een punt dus waar

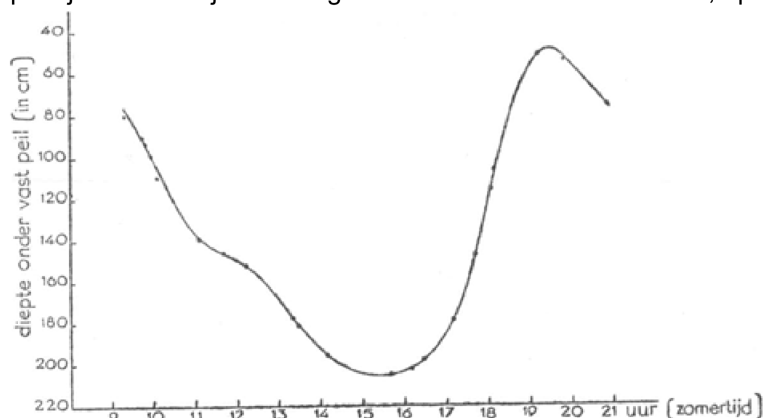


Fig. 74. Ebbe en vloed, met eenvoudige hulpmiddelen waargenomen te Zandvoort.

het waterlaagje zeer ondiep is. *De top van dit paaltje zal nu het vaste peil zijn*, *ten opzichte waarvan wij telkens de stand van het water aflezen*. Zet uw stok naast het paaltje, druk hem in het natte zand tot hij vast staat, en tot een gehele decimeterstreep zich bij de top van het paaltje bevindt. Het aflezen van het peil van het water is niet gemakkelijk, omdat elke golf het doet stijgen als ze aankomt en doet dalen als ze terugvloeit. Kies het ogenblik waarop de stroming omkeert; als u dit voor enkele achtereenvolgende golven doet, zult u merken dat zelfs bij niet zeer rustige zee het gemiddelde peil verrassend standvastig is (bedenk daarenboven dat een fout van 5 cm nog niet veel hindert!).

Dergelijke metingen doen we nu ongeveer om het kwartier

1) In geval die mochten ontbreken, werkt men op de wijze, aangegeven in § 83.

of om het halve uur. Weldra bemerken we dat het peil verandert; wellicht daalt het, straks is het misschien al zoveel lager, dat we ons paaltje niet meer gebruiken kunnen en naar een ander moeten overgaan. Maar het is heel gemakkelijk de toppen der paaltjes op elkaar te betrekken, door te mikken op de kim en het hoogteverschil af te lezen; dat gaat heel scherp! (Zie fig. 73). Zo krijgen we dus telkens enige metingen aan elk paaltje, tellen er een vast getal bij of trekken het af om te herleiden op het éne paaltje dat wij als vast peil hadden uitgekozen, en maken een grafische voorstelling van het geheel. Het is zaak, tenminste 12 uur vol te houden, en niet op te zien tegen het telkens uittrekken van schoenen en kousen, noch tegen de belangstelling der overige badgasten, die u wel voor een ambtenaar van de Waterstaat zullen houden!

De kromme lijn die we verkrijgen is buitengewoon belangwekkend (fig. 74). Nu pas krijgen we inzicht in de ware peilverandering van de zeespiegel, terwijl we anders voortdurend misleid werden door de golvende zandbanken en zwinnen van het strand. - Het verschil in peil tussen *hoog water* en *laag water* heet het *tijverschil*; in het door ons gemeten geval bedroeg het 1,55 m, wat aardig uitkomt met fig. 76 b. Verwar deze benamingen niet met *eb en vloed*, die betrekking hebben op het dalen of op het stijgen van de waterspiegel!

Vervolgens zien we, dat de kromme sterk afwijkt van een sinuslijn. Laag water valt niet midden tussen twee maxima; het water daalt gedurende ongeveer 9 uur, en stijgt in slechts 3 uur! Vandaar het spannende ‘opkomen van de vloed’, als de

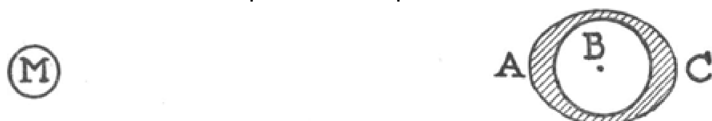


Fig. 75. De dubbele vloedgolf welke de Maan op Aarde doet ontstaan (de hoogte van de golf is sterk overdreven).

zandkastelen met heldenmoed verdedigd worden tegen de aanstormende golven. Merk ook op dat het water geruime tijd in zijn laagste stand blijft vóór het merkbaar gaat wassen, terwijl hoog water slechts even bereikt wordt. - Dit verloop van het getij verschilt van de ene kustplaats tot de andere.

Tenslotte geeft onze kromme ons de gelegenheid, nader in te gaan op de oorzaak der getijbeweging. - Men leert in de

sterrekunde hoe de getijden in hoofdzaak ontstaan tengevolge van de aantrekkingskracht van de Maan (fig. 75). Maan en Aarde draaien om hun gemeenschappelijk zwaartepunt; voor het centrum der Aarde (B) heffen aantrekkingskracht en middelpuntvliedende kracht elkaar net op. Het water bij A echter bevindt zich dichter bij de Maan en wordt sterker aangetrokken dan het punt B; het water bij C bevindt zich verder van de Maan en wordt zwakker aangetrokken, zodat daar de middelpuntvliedende kracht overheerst. Er ontstaat aldus een *dubbele* vloedgolf, en in een bepaald punt van de Aarde moet men in één etmaal tweemaal vloed en tweemaal ebbe waarnemen. Men zou verwachten hoog water te zien op het ogenblik dat de Maan zoveel mogelijk ‘boven ons hoofd’ staat, dus in het Zuiden; of (onzichtbaar) ‘onder onze voeten’, in het Noorden. Dit is het geval:

	bij nieuwe Maan, om 12^h of 24^h;	
7 dagen ↕		↕ 6 uur
	bij eerste kwartier, om 18^h of 6^h;	
7 dagen ↕		↕ 6 uur
	bij volle Maan, om 24^h of 12^h;	
7 dagen ↕		↕ 6 uur
	bij laatste kwartier om 6^h of 18^h.	

Laten wij nu eens door eigen ervaring nagaan of het uitkomt! De kromme welke wij hebben waargenomen (fig. 74) heeft betrekking op 23 Augustus 1936. Een willekeurige almanak leert ons, dat de Maan op 25 Augustus, 6^h voormiddag, de schijngestalte van het eerste kwartier vertoonde; zij moest zich dus op 23 Augustus ongeveer om $16^h\ 45^m$ in het Zuiden bevinden, dit is te $17^h\ 45^m$ zomertijd. Dit komt helemaal niet uit met de getijkromme! Hoog water is in werkelijkheid pas om $19^h\ 30^m$ ingetreden.

Deze waarneming is geen uitzondering, zij is integendeel de regel. Het hoog water komt in 't algemeen verscheiden uren nadat de Maan in 't Zuiden (of in 't Noorden) stond! Deze vertraging t.o.v. de Maan heet het *maanvloedinterval*; en het maanvloedinterval omstreeks volle of nieuwe Maan is *de haventijd* der betreffende kustplaats. Ieder die een tijdje aan 't strand verblijft moest zijn haventijd kennen, want daarmee kan men al aardig benaderd de ogenblikken van hoog en laag water voorspellen. Als we deze bepalingen op verschillende dagen uitvoeren, vinden we dat het tijdsverschil niet altijd nauwkeurig gelijk is aan de haventijd, maar soms iets korter, soms iets langer; gemiddeld is er dus een correctie aan te brengen. -

Bovenste regel: ogenblik waarop de Maan in 't Zuiden staat (van middag of middernacht gerekend). Onderste regel: de aan te brengen correctie.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 uur
+32	+17	0	-17	-32	-43	-46	-33	0	+33	+46	+43	+32 min

Deze correctie heet: *de halfmaandelijkse ongelijkheid*; zij is te

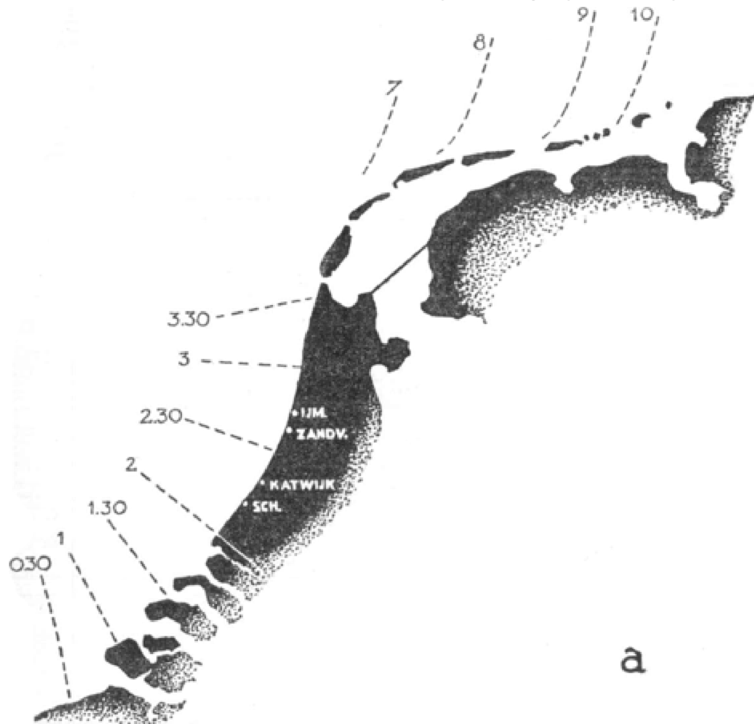


Fig. 76*a.* De haventijden langs de Nederlandse kust.

wijten aan de Zon, die evenals de Maan getijden veroorzaakt.

Te Zandvoort is de haventijd ongeveer $2^h\,40^m$. Op 23 Augustus ging de Maan te $16^h\,45^m$ door het Zuiden; het moest dus vloed zijn te $16^h 45^m + 2^h 40^m - 0^h 43^m = 18^h\,40^m$ (of $19^h 40^m$ zomertijd). Dit klopt nu heel aardig met de waarneming.

Krachtiger dan anders moesten de getijden zijn bij volle en nieuwe Maan, als de werking der Zon die van de Maan komt

versterken; in werkelijkheid zijn ze dat een paar etmalen later: het is dan *springvloed*. De nieuwe eigenaardige vertraging die hier optreedt noemt men *de ouderdom* van het getij. Bij springtij is het tijverschil te Westkapelle 0,50 m groter dan gewoonlijk, elders 0,30 m.

Wat is nu de verklaring voor die vertragingen? Men zou kunnen denken aan de invloed van de Zon. Inderdaad is deze

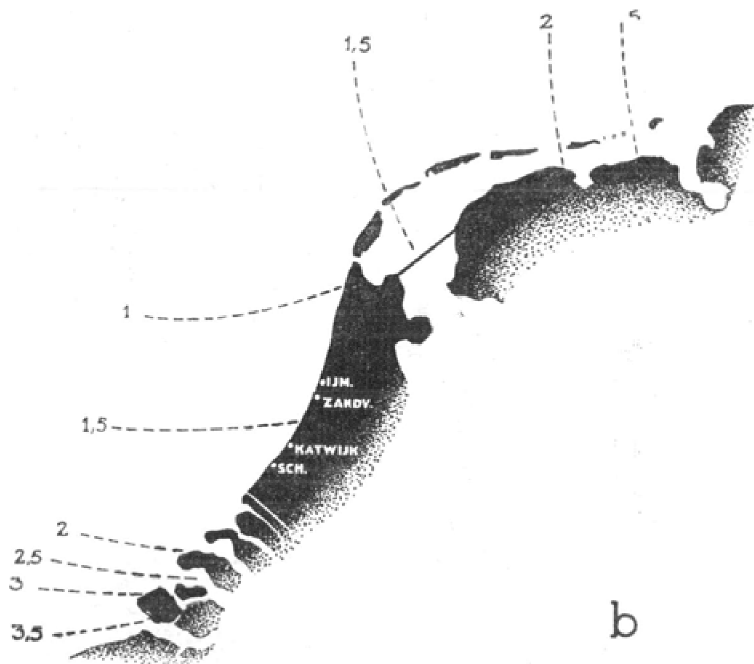


Fig. 76*b*. Het gemiddelde tijverschil langs de Nederlandse kust, in meters.

zeer merkbaar; maar de eigenlijke oorzaak is dit niet, want bij volle en nieuwe Maan kan de Zon alleen de werking van de Maan verzwakken of versterken, maar niet van richting doen veranderen; en hetzelfde geldt ook bij eerste en laatste kwartier. - Op de juiste verklaring komt men, als men weet dat de haventijd van kustplaats tot kustplaats verandert. In Zeeland is het 1 uur, bij IJmuiden 3 uur, bij Texel al 7 uur (fig. 76*a*)! De schommeling van eb en vloed geschiedt dus wel overal in

de *periode* die de Maan haar opdringt, maar *phase* en *amplitude* worden door de eigentrillingen der oceanen bepaald: waar

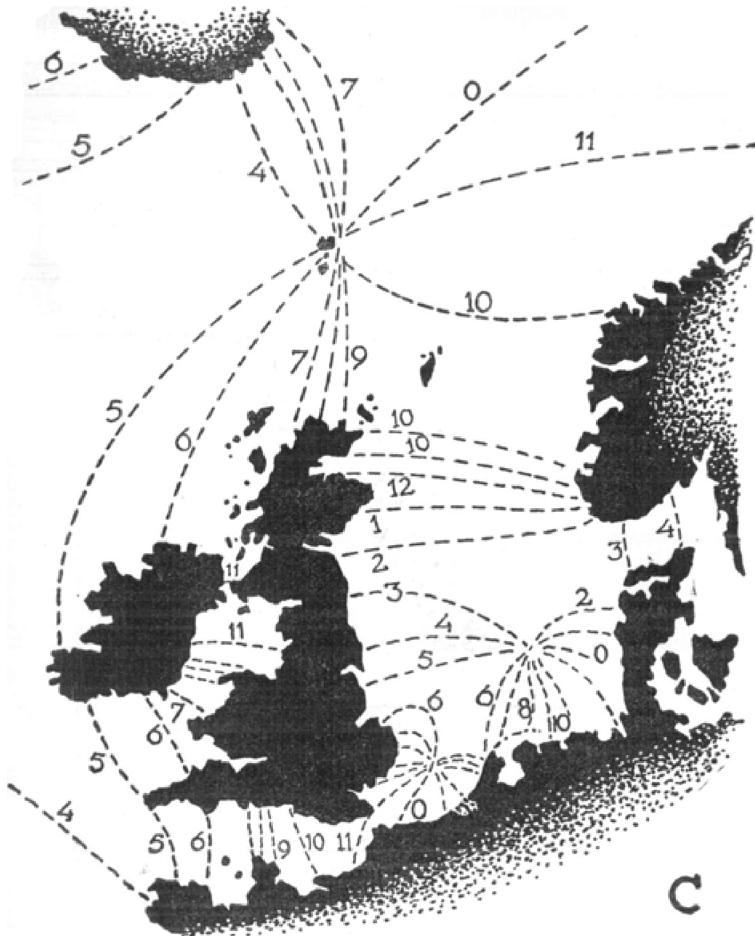


Fig. 76*c*. De getijgolven in de Noordzee, naar R. von Sterneck. De cijfers geven de tijdsverschillen in uren aan.

een oceaanbekken de geschikte afmetingen heeft om met de getijschommelingen mee te trillen, ontwikkelt zich de eb- en vloedbeweging het sterkst. De Noordzee is een binnenzee, die

geen ‘eigen’ getijden heeft, ze krijgt echter door haar noordelijke verbinding met de Atlantische Oceaan een getijstuwing, die telkens op ingewikkelde wijze in het Noordzeebekken rondloopt (fig. 76*c*).

Het zal hieruit duidelijk zijn, dat het geheel theoretisch vooruitberekenen van de bijzonderheden die we bij de getijverschijnselen waarnemen, slechts in de eenvoudigste gevallen mogelijk is. Uit lange reeksen getijwaarnemingen kan men echter bepaalde constanten afleiden, met behulp waarvan voor de komende jaren zeer nauwkeurige getijtafels te berekenen zijn.

82. Zeebeer.

In zeldzame gevallen ontstaat ook in onze zeeën soms een plotselinge stijging of daling van het water, buiten alle getijregelmaat om. Zo is het in 1924 voorgekomen dat de zee aan onze kust ineens over 1,60 m in 10 minuten steeg, en dan weer snel over 1 m daalde![1)]

Het is mogelijk dat zulke verschijnselen, die aan andere kusten veelvuldiger voorkomen, aan hozen of onweders toe te schrijven zijn, soms ook aan aardbevingen.

Merk op, of de evenwichtsstoring met een stijging of met een zuiging begint. In het tweede geval blijft het daar niet bij, doch volgen er altijd nog verscheidene golvingen: want een enkelvoudige golfverheffing kan zich onveranderd voortplanten, een golfdal echter vervormt zich (§ 100).

83. De beweging van het grondwater.

Een verblijf aan 't strand is een goede gelegenheid om te onderzoeken hoe het zeewater door het zand dringt, en op die wijze een voorbeeld te hebben van de stroming van grondwater.

Spit een kuil in het vochtige zand, op enkele meters van de lijn tot waar de verste uitlopers van de golven op dit ogenblik komen. Zodra een zekere diepte bereikt is, begint er water onder in de kuil te komen. Druk in het zand van de bodem een stokje, waarop hele en halve decimeters met dikke strepen aangegeven zijn (fig. 77). U ziet dat het water in de kuil langzaam stijgt en tenslotte een grens bereikt.

Klaarblijkelijk stond het water in het naburige zand tot op deze hoogte; door het wegnemen van het zand van de kuil is tegelijk

1) P.M. van Riel, De Zee, 989, 1924.

het water tussen de zandkorrels weggehaald: er ontstaat een stroming om het drukverschil te vereffenen, maar die gaat langzaam, omdat het water door de nauwe tussenruimten tussen de zandkorrels moet dringen.

Maak daarnaast snel een tweede kuil, tenminste even diep, en verbind hem met de eerste: het peil van het water zakt eerst, maar weldra herstelt het

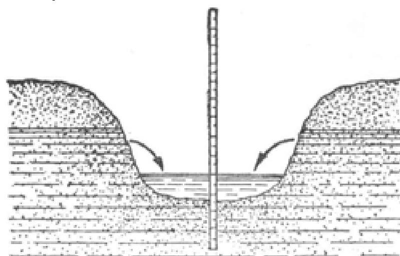


Fig. 77. Een kuil, in het strand gegraven, vult zich met grondwater.

zich. Gooi enige scheppen aarde in het water: het peil stijgt eerst boven het normale, maar zijgt dan langzaam weg tot dit laatste weer bereikt is.

Zou het water in zulk een kuil de getijbeweging meemaken die de zee ons vertoont? - Op een dag dat de zee nogal rustig is, graven we een flinke kuil, een meter of twee landwaarts van de hoogwatergrens. Liefst beginnen we ongeveer één uur voor het ogenblik van hoog water, en we graven, tot er een of twee decimeters water in de kuil staan. We zetten naast de kuil een plankje, waarvan de bovenrand A ons zal dienen als willekeurig maar vast peil (fig. 78). We bukken ons tot we die bovenrand op de horizon zien, en lezen op een duimstok van 1 meter af,



Fig. 78. Het meten der beweging van het grondwater gedurende eb en vloed.

op welke diepte BC het water in de kuil zich onder ons vast peil bevindt. Om de hoogte van het peil der zee af te lezen, nemen we een lange stok DE, insgelijks in decimeters en halve decimeters verdeeld, en duwen hem in 't natte zand, waar de laatste uitlopers der golven nog komen. Het is meestal gemakkelijk hem zover te duwen tot een gehele deelstreep precies op de hoogte van 't vaste peil staat. De meting bestaat nu in het geregeld aflezen van de afstanden BC en DE; het zal nodig

zijn, af en toe de stok DE te verzetten, maar met behulp van het vaste peil A en de kim zijn de verschillende standen van de maatstok altijd op elkaar te betrekken.

In fig. 79 ziet men een dergelijke reeks waarnemingen grafisch voorgesteld. Beschouwen wij vooreerst het peil der zee: we zien hoe het opkomende water zijn hoogste stand bereikt, en daarna begint te dalen; de stijging is steil, de daling veel langzamer (vgl. § 81). Nu het water in de kuil! Dit vertoont ook een snelle stijging en een langzame daling; maar aanzienlijk vertraagd ten opzichte van het getij der zee: het ogenblik van

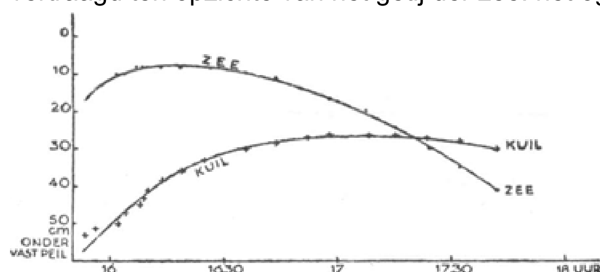


Fig. 79. De vloed, met eenvoudige hulpmiddelen gemeten: *a*) voor de zee, *b*) voor het grondwater.

hoogwater bijvoorbeeld is een vol uur verschoven. Daarenboven is de amplitude van de schommeling geringer; de hoogste stand blijft 18 cm beneden die van de zee.

We hebben geen waarnemingen omstreeks het ogenblik van de laagste stand, maar als we schatten dat het water op dat ogenblik 12 cm boven het laagste peil der zee staat, zou het tijverschil in de kuil 1,25 m bedragen tegen 1,55 m in zee (vgl. § 81). De vertraging en de demping der getijbeweging in het zand zijn natuurlijk te verklaren door de wrijving die het water in de capillaire ruimten tussen de zandkorrels ondervindt; zijn stroming wordt daardoor in hoge mate belemmerd. Zo komt het, dat water in de kuil nu eens hoger, dan weer lager staat dan het peil van de zee. - Merk op dat bij hoog water, als het zeewater bijna tot de rand van de kuil spoelt, het water daar nog wel 25 cm beneden zeepeil staat.

Verenig u met andere waarnemers; graaft een reeks kuilen op verschillende afstanden van de hoogwatergrens en leest gedurende een zo lang mogelijke tijd het peil van het water op die verschillende punten af.
Vergelijk met II, § 67.

87. De plemyrameter.[1)]

Dit is een eenvoudig maar uiterst gevoelig toestel, bestemd om kleine veranderingen in het peil van een meer of van een rivier te bestuderen. Het is uitgevonden door Forel, een geboren natuuronderzoeker van 't vrije veld; en het was hem een waardevol hulpmiddel bij zijn onderzoekingen over de eigentrillingen van meren.

Een waskom van 25 cm middellijn wordt op een geschikte, lage plaats van de oever ingegraven, tot de bodem enkele cm onder het peil van het water staat (fig. 80). Met een gummislang, die men eerst geheel met water vult en die dan als hevel dient,

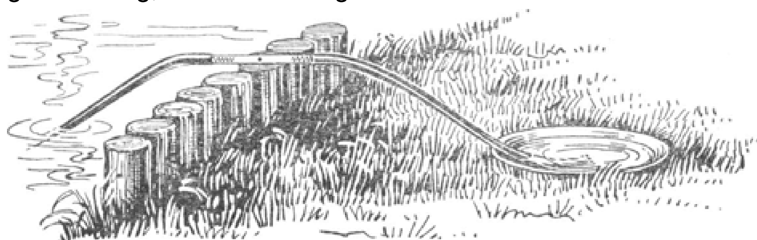


Fig. 80. Onderzoek naar kleine schommelingen in het waterpeil met de plemyrameter van Forel.

verbindt men de waskom met het meer; elke peilverandering heeft nu ten gevolge, dat er water door de gummislang naar of van de waskom stroomt. Om die stromingen goed te kunnen waarnemen, verdelen we de gummislang in tweeën, en schakelen er een glazen buis in van ongeveer 30 cm lengte en 1 cm middellijn. In die buis komt een index, bestaande uit een bolletje was, waarin enkele zandkorrels gekneed zijn die hem bezwaren, tot hij bijna precies zweeft (zorgvuldig regelen!); twee koperdraadjes, spiraalsgewijs gewonden en aan beide uiteinden in de buis geschoven, beletten dat de index te ver meegesleept wordt. Zodra nu het peil verandert en het water in de buis gaat stromen, beweegt de index naar het ene of het andere uiteinde, en blijft daar zitten zolang de stroming duurt. Het toestelletje is buitengewoon gevoelig, hoogteverschillen van 1 mm worden al duidelijk aangewezen.

Met de plemyrameter kan men ‘vibraties’ aantonen in vrijwel elke vijver of waterplas. Een grote steen of een plank, die men er in werpt, een boot die in de verte nadert veroorzaken lange,

1) *πλημυρα* = vloed. - Forel, Le Léman (1895), blz. 89.

onzichtbare golven, die een aantal malen heen en weer lopen en die met vaste tijdsruimten terugkeren (enkele sekunden tot enkele minuten). Dikwijls vindt men *eigentrillingen* van de vijver als geheel of van bepaalde bochten, welke trillingen dan bijzonder versterkt worden. Het zijn dezelfde verschijnselen welke bij de grote meren als 'seiches' bekend zijn.[1)]

85. Oefeningen in het waarnemen van watergolven.[2)]

Er zijn twee wijzen om naar snelbewegend water te kijken.

1. Vooreerst kan men *strak in dezelfde richting* blijven kijken. Men bemerkt dan dat een steen, die boven het water van de beek uitsteekt, omringd is door een mooi golvenpatroon, hetwelk volmaakt in rust blijft; overigens schijnt het oppervlak vrijwel glad. Dergelijke beelden krijgt men ook door te fotograferen.

2. Men kan echter ook het oog *met het water mee* bewegen; enige oefening is daartoe nodig: men volge bijvoorbeeld een blaadje met de blik, of sluite half de ogen. Nu komen allerlei golven te voorschijn die met het water meelopen, het schijnbaar gladde oppervlak blijkt vol oneffenheden en strukturen te zitten. Prachtig kan men deze kunst beoefenen als het regent en men aan de oever van een vijver of singel staat. In alle richtingen lopen rimpels over het oppervlak. Door de blik langzaam en gelijkmatig over het water te laten glijden, ziet men alle golfjes die in een bepaalde richting bewegen als één groot front vooruitschuiven, terwijl de andere golfjes onzichtbaar of zeer onduidelijk worden. Beweegt men zijn blik in een andere richting, dan ziet men ook daar een golffront.

De oefening der ogen die men met zulke waarnemingen verwerft is van grote waarde voor de bestudering van staande en lopende golven bij beken, watervallen, brandingverschijnselen enz. Vaughan Cornish, die een groot stuk van zijn leven aan die onderzoekingen heeft besteed, beweert dat hij sommige golfverschijnselen slechts kan onderscheiden als hij zich eerst weer opnieuw *maandenlang* in het waarnemen heeft getraind!

Fotografeer allerlei golfverschijnselen! Lichtsterk objektief; belichtingstijd nooit meer dan 1/20 sec.

1) Een ander eenvoudig toestelletje is beschreven door A. Endrös, Pet. Mitt. **50**, 294, 1904. Vgl. ook Pet. Mitt. **58**, 257, 1912.

2) Over watergolven: Scott Russell, Rep. Brit. Assoc. 1844. - Vaughan Cornish, Geogr. Journ. 1903. - Zie ook de algemene litteratuur, aangegeven op blz. 109.

86. Een steen valt in het water.

Neem eerst een vrij grote steen van een centimeter of vijf, en gooi hem in het water. Wat er precies gebeurt op het ogenblik van de plons is moeilijk uit te maken; feitelijk heeft de steen een holte in het wateroppervlak gemaakt, die holte sluit zich aan de bovenkant en men hoort een geluid (II, § 50), het water heeft een duw gekregen naar alle kanten en is dan weer teruggeschommeld. Maar nu wachten we. Enkele fijne rimpels dempen na een paar sekunden uit; en daar ontstaan de welbekende kringen, verrassend lang nadat de steen gevallen is; 5 sekunden, 10 sekunden na die tijd pas hebben ze zich goed ontwikkeld. Er komen er steeds meer, hoe langer we wachten, maar tegelijk worden ze vlakker tot we ze tenslotte niet meer kunnen zien. Duidelijk merken we op dat de voorste golven de grootste golflengte hebben, de achterste de kleinste (1 of 2 cm). Als ik al die golfjes bij mekaar kon optellen, zou ik voor het ogenblik waarop ik de proef begon, weer de oorspronkelijke stuwing van het water krijgen, die de steen veroorzaakt heeft. Al die golven van verschillende golflengten zijn nu uit elkaar gehaald, doordat de grote golven sneller lopen dan de kleine, en dus op een gegeven ogenblik verder gekomen zijn. Het water werkt als een echte spektroskoop, die wit licht in zijn samenstellende kleuren ontleedt!

Herhaal nu de proef met een klein licht dingetje: een stuk van een grasje, een korreltje, een ineengefrommeld bolletje papier, en kijk onmiddellijk naar wat er gebeurt. Ook nu ontwikkelen zich kringen, maar de voorste golfjes zijn ditmaal heel fijne rimpelingen, terwijl de laatste toenemend breder zijn, tot een golflengte van 1 of 2 cm. Dus net andersom als bij de grote golven!

Bij toenemende golflengte lopen de watergolven dus eerst langzamer, *bij een golflengte van een paar cm is de snelheid het geringst*, *en de grotere golven lopen weer toenemend snel*.

Door slechts een geringe evenwichtsverstoring teweeg te brengen, hebben we de vorming van lange golven vermeden, die bij de eerste proef de even snel lopende rimpeltjes overdekten; en door snel na het inwerpen te kijken, hebben we vermeden dat de kleine rimpels al uitgedempt zouden zijn.

Dat golven van verschillende golflengte verschillend snel lopen, is een der merkwaardigste eigenschappen waardoor watergolven zich onderscheiden van geluid- of lichtgolven in het luchtledige. (Zodra echter het licht of het geluid zich voortplanten door

stoffen ‘met dispersie’, ontstaat er ook verschil van voortplantingssnelheid: in water loopt bijvoorbeeld het licht van een violet lichtsignaal langzamer dan dat van een rood). Het gevolg daarvan is, dat een mengsel van watergolven van allerlei golflengten weldra door het voortlopen uiteengerekt wordt, vervormd.

Van een groepje golven is de *groepsnelheid* soms veel kleiner dan de individuele *golfsnelheden*. Om dit waar te nemen heeft u slechts de proef met de grote steen te herhalen, en nu op één bepaald golfje te letten. Volg het scherp met de ogen: het loopt veel sneller dan de groep; het is eerst een der achterste golfjes, komt vooruit en wordt groter, bereikt ten slotte de voorste rangen van de groep en sterft daar uit. Deze waarneming is niet heel gemakkelijk en lukt maar als men de proef verscheiden malen herhaalt.

87. Voortplantingssnelheid, golflengte, trillingsgetal.

We zitten aan de oever van een stille vijver, en vermaken ons met een plankje. We houden het loodrecht, terwijl zijn smalle kant het water raakt, en tikken dan snel met de andere hand, zodat het plankje telkens in en uit het water wipt. De golfjes lopen langzaam voort over het wateroppervlak; we zien ze vooral prachtig als het water ondiep is, en de zon onder ieder golfje een lichtribbel over de boden laat lopen.

Eigenlijk is het vanzelfsprekend dat de afstand V die de golfjes per sekunde afleggen gelijk is aan de golflengte λ maal het aantal golven per sekunde n:

$V = n\lambda$

Toch willen we 't nog door een schatting bevestigen. We beproeven nauwkeurig 4 maal in de sekunde te tikken. Een ander waarnemer schat de lengte van de golfjes, liefst door vergelijking met een duimstok, een takje van bekende lengte, enz.; hij schat de golflengte op $\lambda = 8$ cm. Tenslotte vat hij een bepaald golfje scherp in 't oog, wijst het aan met een stok en volgt het: de weg die de stok in 5 sekunden aflegt is 150 cm, zodat $V = 30$ cm/sec, wat niet slecht klopt met het produkt $8 \times 4 = 32$.

U zult wel merken dat het rechtstreeks bepalen van V moeilijker en onnauwkeuriger is dan het berekenen uit $n\lambda$.

88. Voortplantingssnelheid van watergolven.

Toen we de golven bekeken om het punt waar een steen in het water gevallen was, kwamen we tot volgend besluit (§ 86): 'bij toenemende golflengte lopen de watergolven eerst langzamer; bij een golflengte van een paar centimeter is de snelheid het geringst, de grotere golven lopen weer toenemend snel.'

William Thomson heeft daar een verklaring voor gegeven.[1] De watergolven worden door twee onderscheidene krachten in beweging gehouden, de *gravitatie* en de *oppervlaktespanning*. Bij lange golven werkt vooral de eerste: het water van de golfberg heeft de neiging in het golfdal te vallen; bij korte golven werkt vooral de tweede, want als de rimpelingen heel klein worden verzet zich het oppervlak tegen de sterke krommingen, die het plaatselijk uitrekken. In het tussengeval spelen beide krachten een rol. Hiervan uitgaande vond Thomson, dat de voortplantingssnelheid in een vloeistof van dichtheid *s* door volgende formule beschreven wordt:

$$(1) \quad V^2 = n^2\lambda^2 = g \cdot \frac{\lambda}{2\pi} + \frac{\alpha}{s}\,\frac{2\pi}{\lambda} = 159\lambda + \frac{470}{\lambda} \approx 158\left(\lambda + \frac{3}{\lambda}\right).$$

De eerste term van deze formule slaat op de gravitatie, hij overweegt sterk zodra $\lambda > 10$ cm. De tweede term heeft betrekking op de oppervlaktespanning *a*, waarvan wij de waarde hebben ingevuld; hij overweegt voor $\lambda < 0,5$ cm. Men ziet dat er voor $\lambda = 3/\lambda$ een minimum-snelheid optreedt van ongeveer 23 cm/sec bij een golflengte $\lambda = \sqrt{3} = 1,7$ cm en een trillingsgetal $n = 14$. Het gehele verloop van V is uit fig. 81 af te lezen.

Om die theorie aan de werkelijkheid te toetsen nemen we weer het eenvoudige plankje, dat we periodiek in het water dompelden om golfjes te maken. We tikken er eerst zo snel mogelijk op, daarna langzamer. Volg de golfjes met de ogen: het is opvallend hoeveel sneller ze lopen naarmate ze groter worden! Versnel het tempo weer waarin u tikt: de golfjes worden weer kleiner en trager. Klaarblijkelijk zijn dit gravitatiegolven.

We veranderen het trillingsgetal *n* binnen zo wijd mogelijke grenzen. Zes, zelfs zeven maal in de sekunde kunnen we nog vrij regelmatig tikken; dan gaan we geleidelijk over tot steeds langzamer bewegingen. Om mooie golven te krijgen, moet de afstand waarover we op en neer gaan geschikt gekozen worden;

1) Phil. Mag. **42**, 368, 1871. - Vgl. ook Matthiesen, Ann. Phys. **38**, 118, 1889; Berl. Ber. 772, 1889.

beproef hem wat groter of wat kleiner te maken; voor een trillingsgetal in de buurt van 1 trilling per sekunde gebruiken we met voordeel de brede vlakke zijde van de plank. - Telkens bepalen we zo goed mogelijk λ, en berekenen V door het produkt $n\lambda$ op te maken. Zet de waargenomen punten in fig. 81 uit, en zie of ze ongeveer op de theoretische lijn vallen! Ik denk dat u verrast zult zijn over de goede overeenstemming! - Alleen moet ik nog even opmerken dat de formule van Thomson slechts geldt zolang het water tenminste één, liever twee golflengten diep is, en dat u de plaats waar u uw proeven neemt wel in overeenstemming met die eis dient te kiezen.

De heel korte golfjes kunnen we op deze wijze niet bestuderen, omdat we het plankje niet snel genoeg aan het trillen kunnen brengen. Toch zijn die juist zó belangwekkend! Om ze te zien te krijgen, houden we een plankje, een tak, een potlood, een zakmes in een snelvlietende beek; of laten eenvoudig een touwtje, met een gewicht bezwaard, in het water hangen. Om het touw vormt zich een allersierlijkst golvenpatroon, dat volmaakt stilstaat terwijl het water stroomt. Heeft u wel eens bedacht hoe buitengewoon merkwaardig dat eigenlijk is? De golfjes van het patroon hebben dus ten opzichte van het water een voortplantingssnelheid die *nauwkeurig* gelijk en tegengesteld is aan de stroomsnelheid van het water; automatisch worden juist golfjes van een dusdanige golflengte gevormd dat aan die voorwaarde voldaan is. Er moet dus een vast verband bestaan tussen de golflengte der stationaire ribbels en de snelheid van het water: het verband dat gegeven is door de formule van Thomson. Het is nu duidelijk wat we te doen hebben om de heel kleine rimpels te bestuderen: de golflengte van de stationaire rimpels om een afhangend touw schatten, en tegelijk de snelheid van het water afleiden uit de beweging van drijvende voorwerpen. Nog iets gemakkelijker kunnen we 't ons maken door een rustig vijvertje of kanaaltje op te zoeken, en ons touw zelf te bewegen ten opzichte van het rustende water: we kunnen dan proeven nemen met allerlei snelheden V naar keuze. Het mooist gaat dat als we ons in een boot bevinden, waarvan de snelheid vanzelf geleidelijk afneemt; maar het is ook al voldoende als we eenvoudig langs de oever lopen, en het touw met uitgestrekte hand vasthouden.

We beginnen met ons touw betrekkelijk *snel* door het water te bewegen, en het golfpatroon aandachtig te bekijken. Het is opvallend dat de golfjes vóór het touw zeer kort zijn, die achter het touw veel langer. *Blijkbaar zijn er twee soorten golfjes die*

zich met dezelfde snelheid kunnen voortplanten. Zie maar naar figuur 81: dat klopt inderdaad met de theorie! De korte golfjes *vóór* het touw zijn de capillaire rimpels, die *achter* het touw zijn de gravitatiegolven. De twee golflengten λ_1, λ_2, die wij op het oog vrij goed kunnen schatten, zijn de twee wortels van vergelijking (1), die men zich naar λ opgelost kan denken! - Op de schuine golfjes die op schone wijze naar rechts en links wegbuigen, willen we voorlopig niet teveel letten.

Verminder nu de snelheid van het touw: de twee soorten golven schelen niet meer zoveel,

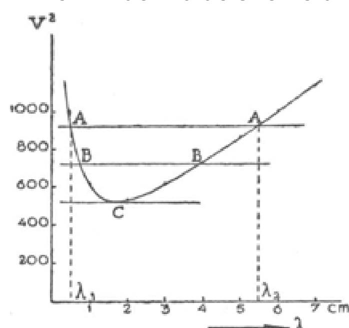


Fig. 81. De snelheid van watergolven als funktie van de golflengte.

de capillaire golven zijn langer geworden, de gravitatiegolven korter. Dit komt precies overeen met de overgang van de lijn AA naar BB in fig. 81. Merk tevens op dat de zijdelingse golfjes, die het patroon rechts en links begrenzen, nu meer zijn gaan uiteenwijken, en een veel grotere hoek met de symmetrielijn vormen dan eerst.

Bij nog kleinere snelheid worden tenslotte de twee soorten golven even lang, terwijl de zijdelingse golfjes zich geheel en al loodrecht op de bewegingsrichting instellen. Dit komt overeen met het samenvallen der twee snijpunten in C in fig. 81, en met het optreden van twee gelijke wortels in vergelijking (1) op blz. 141. We hebben thans de kleinste snelheid bereikt die watergolven kunnen krijgen: 23 cm/sec, bij λ = 1,7 cm.

Bij een snelheid beneden 23 cm/sec vormen zich geen golven meer om het bewegende touw. Als men af en toe soms een kringetje ziet, is het wanneer het touw toevallig een rukje gekregen heeft.

Schat λ_1 en λ_2 bij allerlei snelheden *V*; behelp u met duimstok en horloge! Vul de kurve aan die u aan het construeren waart en vergelijk met de theoretische: ook thans is de overeenstemming in het algemeen uitmuntend.

> Bemerk hoe het golvenpatroon terug te vinden is bij *elk* voorwerp dat door het water beweegt; capillaire golfjes ziet men ook mooi aan de voorsteven van een boot die met een snelheid van bijvoorbeeld 50 cm/sec voortbeweegt.
> Van de waterrimpels die zich vóór het bewegende touw vormen, hebben

de een of twee eerste iets groter golflengte dan de andere: blijkbaar wordt het water een weinig meegevoerd door het bewegende voorwerp.[1)]
Soms zijn er een groot aantal van die rimpels, even later zijn er maar twee of drie meer te zien, en dan onverwacht spreiden ze zich weer uit; deze veranderingen schijnen samen te hangen met geringe verontreinigingen van het oppervlak. Men zou verwachten dat de voortplantingssnelheid van de kleine rimpels op een verontreinigde sloot merkbaar kleiner is dan op zuiver water; kijk eens of u daar iets van vindt!
Bekijk aandachtig de rimpeling die ontstaat als u een touw (met er aan hangend gewicht) of een plankje langzaam door rustig water beweegt. Giet nu enkele druppels terpentijn of ether op het wateroppervlak: de rimpeling is verdwenen[2)]!
Verklaring: door terpentijn of ether wordt de oppervlaktespanning sterk verminderd.

Er is nog een opmerking die betrekking heeft op onze proef

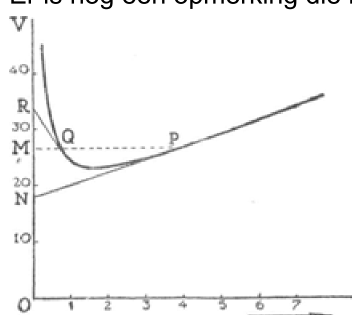


Fig. 82. Golfsnelheid en groepsnelheid bij watergolven.

met het schietlood dat we door het water bewogen, en die te belangrijk is om ze niet te vermelden[3)]. Hoe komt het toch, dat we de capillaire rimpels alleen *vóór* het touw zien, de gravitatiegolven *er achter*? Dat is alweer een gevolg van het verschil tussen golfsnelheid en groepsnelheid, een verschil dat ontstaat zodra golven van verschillende golflengte verschillende snelheden hebben, - zodra er dispersie is, dus. Een groep bestaat altijd uit componenten van allerlei golflengten; hebben die verschillende snelheden, dan zullen ze zich meer en meer van elkaar verwijderen en het profiel van de groep zal niet tegelijk met hen meegenomen worden. Men bewijst dat

$$\text{groepsnelheid} = V - \lambda \frac{dV}{d\lambda}.$$

Voor capillaire golven is zij dus *groter* dan *V*, en wel gelijk aan 3/2*V*. Voor gravitatiegolven is zij *kleiner*, en wel in diep water gelijk aan *V*/2, in ondiep water gelijk aan *V*. Zo komt het dat het patroon der capillaire golven altijd het touw vooruit loopt, en dat der gravitatiegolven achteraan komt! - Voor de golven

1) L. Matthiesen, Ann. Phys. **38**, 126, 1889. - Scott Russell, t.a.pl. blz. 377-378.
2) J. Langton, Nat. **5**, 241, 1872.
3) O. Reynolds, Nat. **16**, 343, 1877.

die zich met minimumsnelheid voortplanten, is dV/dλ = 0, dus groepsnelheid en golfsnelheid zijn gelijk.

In de grafische voorstelling van V als functie van λ is dit onmiddellijk aanschouwelijk te maken (fig. 82): voor golven overeenkomend met het punt P is de golfsnelheid OM, de groepsnelheid ON is kleiner (NP is de raaklijn in P). Voor een punt Q is de golfsnelheid ook OM, maar de groepsnelheid OR is ditmaal groter.

89. De bepaling der minimum-snelheid.

William Thomson vertelt[1]:

'Ongeveer drie weken later bevond ik mij bij windstilte in het zeegat van Mull (Schotland), en had ik een uitstekende gelegenheid om met de hulp van Professor Helmholtz en mijn broeder uit Belfast enigszins nauwkeurig de minimum-snelheid uit waarnemingen te bepalen. Op een afstand van twee of drie voet buiten boord hingen we een hengelsnoer uit, zo dat dit het water trof op een punt dat niet merkbaar door de beweging van het vaartuig gestoord was. Onze snelheid bepaalden we door stukjes papier in zee te gooien, die eerst nat gemaakt waren, en de ogenblikken na te gaan waarop ze door twee evenwijdige vlakken gingen, op 912 cm van elkaar, vastgelegd ten opzichte van het vaartuig door merktekens op het dek en het slamdek. Door aandachtig te kijken naar het patroon van rimpels en golven dat de rimpels vóór met de golven achter verbond, had ik opgemerkt dat daarin ook een stel evenwijdige golven voorkwam dat schuin naar elke zijde liep,

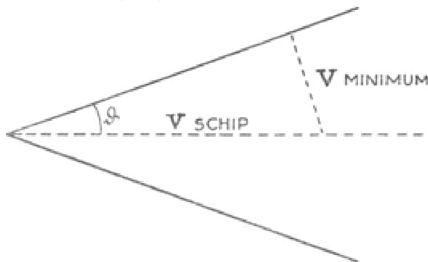


Fig. 83. Het bepalen der minimum-snelheid van watergolven, uit het golvenpatroon om een hengelsnoer.

en waaraan men duidelijk kon zien dat het golven waren van de kritische golflengte en van minimum-snelheid (fig. 83). De componente der snelheid van het hengelsnoer loodrecht op het golffront dezer golven was dus de ware minimum-snelheid. Om die te meten had men slechts de hoek te bepalen tussen de twee evenwijdige groepen golfbergen en golfdalen aan beide zijden van het zog

1) Nat. **5**, 1, 1871.

van het hengelsnoer, en tegelijk de snelheid waarmee het snoer zich door het water verplaatste. De hoek werd gemeten door de benen van een soort houten passer zo goed mogelijk op het oog evenwijdig aan de twee stelsels golfribbels in te stellen; de hoek waaronder de passer geopend moest worden was de gezochte hoek. Door hem op papier te leggen, twee rechte lijnen langs zijn benen te trekken, en een eenvoudige meetkundige constructie uit te voeren met een geschikte maatstaf, aangepast aan de snelheid van het schip, werd de gevraagde minimumsnelheid gemakkelijk gevonden. Van zes dergelijke waarnemingen werden er twee als onbetrouwbaar verworpen. Hier volgen de uitkomsten der vier andere:

snelheid van 't bewegende lichaam	**minimum golfsnelheid**
51 cm/sec	23,0 cm/sec
38	23,8
26	23,2
24	22,9
	Gemiddeld 23,22

De uiterst geringe afwijking van deze uitkomst ten opzichte van de theoretische schatting (23 cm/sec) was natuurlijk slechts een toeval, maar bewees toch dat de oppervlakte-spanning van zeewater bij de (niet opgetekende) temperatuur der waarneming niet zeer verschillend kan zijn van die welke ik uit Gay Lussac's waarnemingen aan zuiver water had afgeleid.'

Deze waarnemingen zijn gemakkelijk te herhalen, ook wanneer men niet over een boot beschikt en gewoon langs de oever loopt. Men berekent bij verschillende waarden van de snelheid V het produkt $V \sin \vartheta$, dat constant hoort te zijn, en gelijk aan de minimum-snelheid.

Maak een golvenpatroon door een potlood door 't water te bewegen, en trek dan plotseling het potlood uit het water. De ribbels worden dan zwakker gebogen, meer evenwijdig, en bewegen voort met de grenssnelheid van 23 cm/sec.[1)]

Scott Russell heeft zeer zorgvuldig de eerste stadia van de golfvorming in de buurt van de grenssnelheid onderzocht, door op te letten hoe het vloeistofoppervlak nabij het bewegende touw het licht terugkaatst. Als het touw in rust is, vormt de vloeistof capillair een heuveltje dat zich ongeveer tot 2 cm van het touw uitstrekt; zodra men het touw beweegt wordt dit heuveltje asymmetrisch; bij 20 cm/sec heeft het zich in twee

1) Scott Russell, Rep. Brit. Ass., York 1844.

verdeeld, en weldra vormt zich het eerste capillaire golfje (fig. 84).

De minimum-snelheid in zeer ondiep water (< 1 cm) schijnt nog niet gemeten te zijn. Volgens de theorie is ze kleiner dan in diep water, en de golfjes zijn langer.[1)]

Elke steen, elke kleine hindernis die in snel stromend water

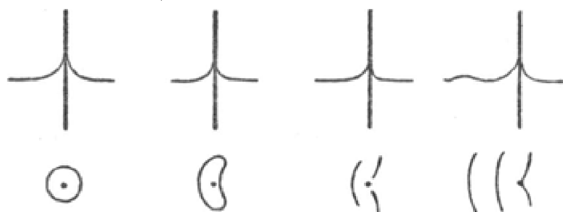


Fig. 84. Golvenpatroon om een hengelsnoer bij snelheden in de buurt van de minimum-snelheid (naar Scott Russell).

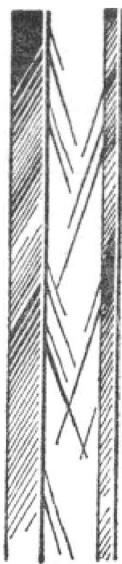


Fig. 85. Schuine golfjes in een hellende tramrail na een regenbui.

hangt, is omringd door een stationair golvenpatroon, waarvan de twee uiterste schuine strepen het meest kenmerkende zijn. Let ook op het water dat na een regenbui langs de tramrails vloeit, als de straat een weinig helt (fig. 85): op een aantal plaatsen lopen schuine strepen dwars over het waterstroompje, alle onder eenzelfde hoek ten opzichte van de wanden; blijkbaar gaan ze uit van bepaalde korreltjes en oneffenheidjes, waaraan zich ook golfjespatronen met lijnen van minimumsnelheid vormen. In die verschillende gevallen is de snelheid van het stromende water steeds onmiddellijk te schatten uit

$$V = \frac{23 \ \text{cm/sec}}{\sin \vartheta}.$$

90. Golfjes op water dat met een ijskorst bedekt is.

Op een wintermorgen was de singel aan beide oevers omzoomd met een zeer dun laagje ijs, terwijl het gehele middengedeelte ijsvrij was. Wierp men nu een steen in het ijsvrije water, dicht bij de ijszoom, dan zag men de gewone, zich kringvormig uitbreidende golfjes ontstaan; maar: 1. de korte, capillaire golfjes breidden zich helemaal niet uit in de ijslaag, blijkbaar omdat de grenslaag hier niet meer vloeibaar was, en er dus geen

1) H. Jeffreys, Proc. R. Soc. **110**, 241, 1926.

oppervlaktespanning meer overbleef; 2. de grotere gravitatiegolven liepen op de merkwaardigste wijze vrijwel ongestoord

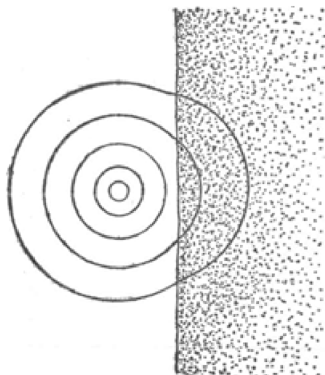


Fig. 86. De voortplantingssnelheid van watergolven is groter, als het water met een zeer dun ijslaagje bedekt is.

door, maar men kreeg de indruk dat de kringen zich vervormden in het met ijs bedekte gedeelte, en wel schenen zij zich daar *sneller* voort te planten (fig. 86). De veerkracht van het elastisch doorbuigende ijsplaatje hielp hier de zwaartekracht dus nog beter dan de oppervlaktespanning het anders doet.

Naderhand bleek mij dat de theorie van deze golven al gegeven is.[1] Als *e* = de dikte van het ijslaagje, E = zijn elasticiteitsmodulus, komt er ongeveer:

$$V^2 = \frac{21e^3E}{\lambda^3} + \frac{g\lambda}{2\pi}.$$

E is van de orde 10^{12}. Het ijslaagje moet slechts een of twee tienden van een millimeter dik geweest zijn.

> Dit verschijnsel is een goed model voor de wijze waarop lichtgolven gebroken worden bij overgang van de ene middenstof naar de andere.

91. Golven in ondiep water.

Aan het strand merken we op hoe al de schuimende golfkammen evenwijdig aan de strandlijn gericht zijn, terwijl toch de golfkammen in de verte, in volle zee, alle mogelijke richtingen hebben. Alleen wanneer sterke wind van opzij waait, bijna langs de kust, is een kleine afwijking van de evenwijdigheid waar te nemen.

Iets dergelijks ziet men aan een meertje: de golven die door de wind naar de oever gedreven worden, richten zich meer en meer evenwijdig eraan, het golffront kromt zich, tot het tenslotte vrijwel geheel de vorm van de strandlijn overgenomen heeft. Hoe kan toch de golf dat ‘voorgevoel’ krijgen van de vorm van de kust?

Deze verschijnselen zijn eenvoudig een gevolg van het feit, dat de snelheid der gravitatiegolven kleiner wordt naarmate

1) Greenhill, Americ. Journ. of Math. **9**. - Basset, Hydrodynamics, II, blz. 180.

de diepte van het water afneemt; deze invloed begint merkbaar te worden, wanneer de diepte van de orde der golflengte wordt of kleiner. Zolang het golffront schuin op de kust staat, planten zich de verst verwijderde delen voort in het diepste water, dus het snelst, en halen de andere in; geleidelijk zwaait het golffront om, tot alle delen ervan in even diep water lopen. Dikwijls kan men dit omzwaaien mooi waarnemen van op een hoog standpunt, bijvoorbeeld van op de pier te Scheveningen. Aan het strand kan een opmerkzaam waarnemer ondiepe plaatsen in zee uit de

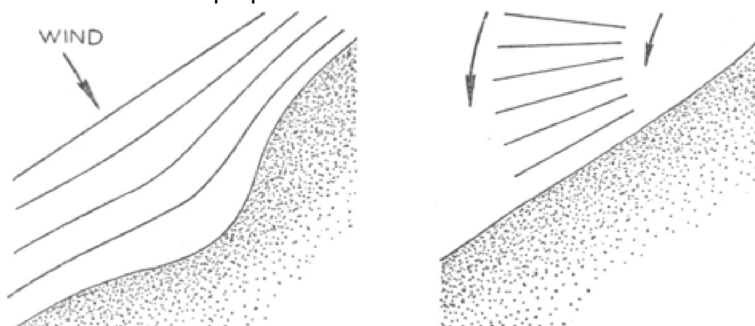


Fig. 87. Bij nadering van de kust zwaaien de golffronten om, tot ze evenwijdig aan de kustlijn lopen.

verte herkennen, doordat de golfkammen daar enigszins achterblijven en zich krommen.

Een zeer opvallende waarneming over dit onderwerp kan men doen na een flinke regenbui. Overal langs de weg liggen er plassen, overal druipen de regendruppels nog van de bomen. Ons oog valt op de kringen die zich om zo'n druppel vormen als hij in de waterplas valt, en we merken op dat die ‘kringen’ helemaal geen cirkels zijn! Ze zijn onregelmatig vervormd, hier een afplatting, daar een uitstulping. We moeten aandachtig kijken, want het gaat snel, maar de afwijkingen zijn toch onmiskenbaar. Blijkbaar is de diepte van de waterplas van de ene plaats tot de andere zeer verschillend, en wordt de snelheid der golven daardoor beïnvloed.

Is dit de juiste verklaring, dan zouden capillaire golfjes wèl zuivere cirkels moeten vormen. Let maar op plassen die niet onder de bomen liggen en waarin slechts af en toe een heel klein druppeltje valt, dat fijne rimpelingen opwekt. Inderdaad zijn deze kringen helemaal gaaf!

De volledige formule voor de voortplantingssnelheid der golven ziet er zo uit:

$$V^2 = \left(g \cdot \frac{\lambda}{2\pi} + \frac{\alpha}{s_1}\frac{2\pi}{\lambda}\right) \operatorname{tgh}\frac{2\pi H}{\lambda}. \qquad (2)$$

Voor grote diepte H is de tangens hyperbolicus = 1 en krijgen we de formule (1) der ‘oppervlaktegolven’ (§ 88); voor kleine diepte wordt hij gelijk aan $2\pi H/\lambda$, en hebben we formule der ‘lange golven’: $V^2 = gH$ (bij verwaarlozing der capillariteit).

92. Hoe watergolven door de inwerking van de wind ontstaan en groeien.

In de natuur ontstaan de watergolven meestal doordat de wind over het wateroppervlak strijkt; zodra hij een zekere snelheid bereikt, begint zich het oppervlak te rimpelen. De bepaling van deze kritische snelheid en van de golflengte der eerstgevormde golfjes is van groot belang om uit te maken of we de invloed van de wind op het water wel bevredigend theoretisch kunnen beschrijven. Toch is er na de waarneming van Scott Russell in 1844 slechts één- of tweemaal een onderzoek naar ingesteld!

Beproef enige bepalingen uit te voeren aan een groot vrij wateroppervlak. Bepaal de windsterkte op verschillende hoogten boven het water, op het ogenblik dat de eerste rimpelingen ontstaan (§ 159); schat de golflengte der golfjes door vergelijking met een duimstok. - H. Jeffreys[1] vindt dat de eerste rimpels optreden bij een wind van 1,15 m/sec, en geeft voor hun golflengte 7 cm op: *het zijn dus van den beginne af reeds kleine gravitatiegolfjes*. Volgens de verouderde theorie van Helmholtz - Wien, die alleen rekening houdt met de wrijving van de wind over het wateroppervlak, zou de vorming integendeel moeten beginnen met capillaire rimpels, maar slechts bij een windsnelheid van tenminste 6,50 m/sec! De eerste golfjes hebben zeer lange kammen, wel 5 maal hun golflengte en meer. Ze planten zich niet voort over aanzienlijke afstanden, omdat ze (als alle korte golven) sterk gedempt zijn door de taaiheid van het water: een plek die toevallig tegen de wind beschermd is vertoont dan ook geen golfjes.[2]

1) Proc. R. Soc. **107,** 189, 1925.
2) Vaughan Cornish beschrijft de vorming der eerste golfjes enigszins anders: eerst zouden golfjes met korte kammen ontstaan, die na 10 tot 30 sekunden in lange kammen overgaan. Scott Russell en Apstein geven nog weer andere beschrijvingen. Moeilijkheden onstaan, doordat men niet nauwkeurig weet hoe groot de windsterkte vlak bij de waterspiegel is, en dat de wind altijd min of meer onregelmatig, buiig blaast.

Van de verschillende theoriën die de invloed van de wind op het water beschrijven, is die van Jeffreys[1] de enige welke met de moderne waarnemingen klopt. Zij houdt rekening met de wervelingen die in de wind ontstaan als hij over de golven strijkt, en maakt er gebruik van dat hij een grotere druk uitoefent tegen de voorzijde dan tegen de achterzijde van de golf (fig. 88). Waar de druk het grootst is, beweegt zich het oppervlak benedenwaarts; in de luwte, waar de druk het kleinst is, wordt het water opwaarts gezogen. Op die wijze wordt de golf vooruit gestuwd, althans zolang als ze nog de windsnelheid niet bereikt heeft. Een aantal verschijnselen betreffende watergolven worden

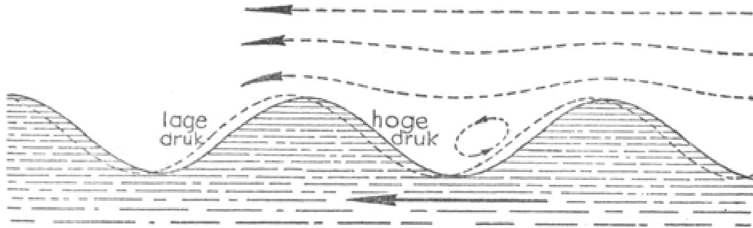


Fig. 88. Het onderhouden der golfbeweging door de wind. Voluit getrokken: het oppervlak op een bepaald ogenblik; gestippeld: het oppervlak even later.

aldus verklaarbaar, maar er blijven toch ook nog moeilijkheden bestaan.

Een studie op zichzelf is weer het onstaan der eerste golfjes op zeer ondiepe plassen, minder dan 1 cm diep. Merk op hoe die plassen nog ongestoord zijn, terwijl de wind al sterk genoeg is om merkbare golfjes te vormen op diep water! Wordt de wind veel sterker, dan vertonen zich het eerst golfjes van slechts 2 à 3 cm golflengte (ongeveer 4 maal de diepte van de waterplas); hun kammen zijn zeer lang ten opzichte van hun golflengte, evenals dit het geval was voor de golfjes die zich in diep water vormden. Grotere golven kan de wind op zulke ondiepe plassen niet doen ontstaan, omdat deze al te sterk in hun ontwikkeling worden belemmerd door de taaiheid van het water.[2]

De verdere groei en ontwikkeling van de golven geschiedt niet alleen wanneer de windsterkte geleidelijk toeneemt, maar

1) Samengevat in Vaughan Cornish, Ocean Waves, blz. 125.
2) H. Jeffreys, Proc. R. Soc. **110,** 241, 1926.

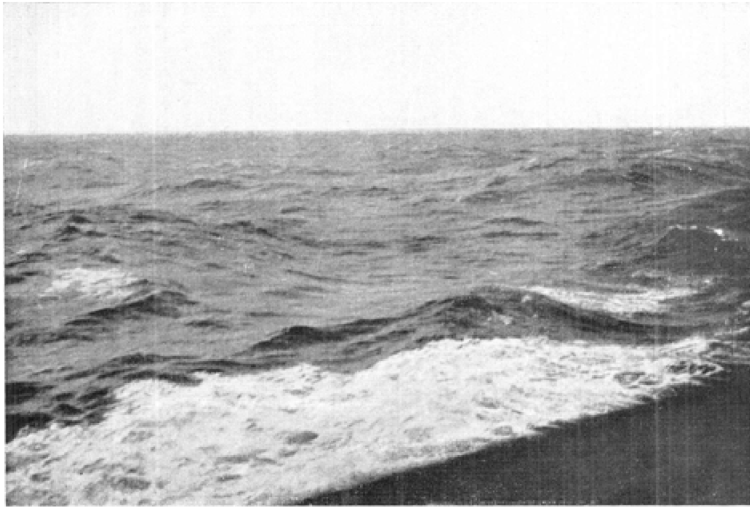
ook wanneer de windsterkte dezelfde blijft: *hoe langer een golfje aan de inwerking van de wind blootgesteld is*, *hoe meer het groeit*.

Op een ietwat winderige dag volgen we de golven die zich op een kleine vijver vormen welke vrij aan de wind blootgesteld is. We beginnen aan de windzijde van de vijver, waar de golven ontstaan, en nu gaan we verder en verder met de wind en de golfjes mee. We zien dan dat *de golflengte* en *de hoogte* der golfjes geleidelijk toenemen. en dat *hun kammen* steeds rechter en langer worden. Hetzelfde opvallende verschijnsel is aan elk kanaal te zien dat voldoende vrij ligt en min of meer in de windrichting loopt. Alleen helemaal aan het einde, aan de lijzijde van de vijver of het kanaal, verdwijnen de golfjes bijna geheel, omdat de wind daar allerlei verontreinigingen bijeengeblazen heeft en het oppervlak met een vetlaagje bedekt is.

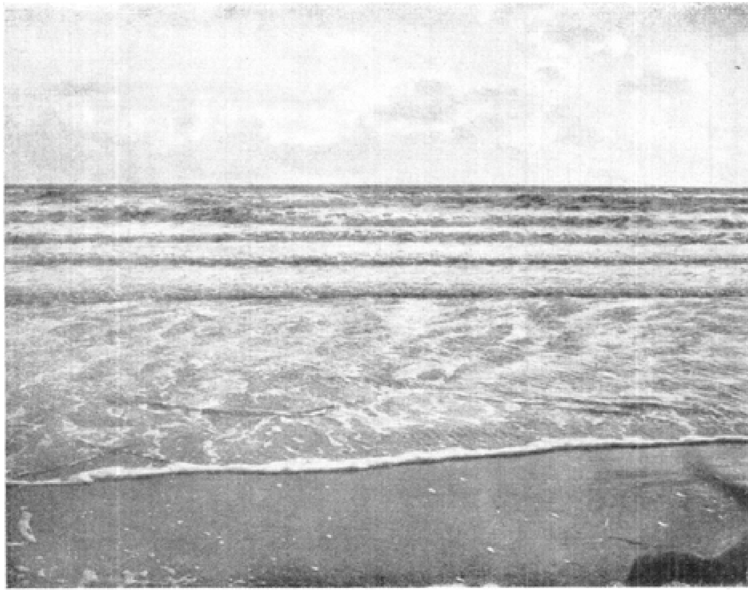
Het is de moeite waard bij snel opkomende storm de golfjes waar te nemen aan de lijzijde van een meer, daar waar hun baan eindigt: ze worden geleidelijk groter, en bereiken hun grenswaarde misschien pas na een uur. En dit aangroeien is niet zozeer een gevolg van toenemende windsterkte, maar veeleer toe te schrijven aan het feit dat de eerst aankomende golfjes slechts een korte, de volgende een toenemend langere baan onder invloed van de wind hebben afgelegd. De grenswaarde wordt bereikt, als golfjes die helemaal aan de overkant ontstaan zijn de tijd hebben gehad ons te bereiken.

Op een dergelijke wijze nu is het, dat de golven der zee ontstaan. Waarom zijn er tenslotte grote golven op de zee en niet op een vijver? Dat is noch door de sterkere wind, noch door de grotere diepte te verkaren, maar eenvoudig omdat het wateroppervlak zo uitgestrekt is, en dat de golven tijd moeten hebben om door de inwerking van de wind te groeien. Vandaar ook dat ze bij storm slechts na geruime tijd hun grootste afmeting bereiken, en dat die eindwaarde des te groter is naarmate de wind meer vrije ruimte heeft gehad: de hoogste golven die men op de Noordzee heeft waargenomen zijn groter dan op de Zwarte Zee; nog groter zijn ze in de Atlantische Oceaan, en het grootst van al in de Stille Oceaan.

Bestudeer bij verschillende weersomstandigheden de golfjes op een snelstromende rivier. Als bijvoorbeeld een felle wind tegen de stroming in blaast, kunnen de golfjes zo groot worden dat ze vrijwel even snel lopen als de stroming, maar in tegengestelde richting. Men kan dan het merkwaardige schouwspel gadeslaaan van bijna onbewegelijke golfpatronen, waaronderdoor de rivier stromend gedacht moet worden.



PLAAT I.
Zeeën en zware deining in de Atlantische Oceaan (§ 93). Naar Vaughan Cornish, Waves of the Sea, bl. 51.



PLAAT II.
Branding, enkelvoudige golven en schuimrand aan een vlakke kust (§§ 97, 100). Naar Vaughan Cornish, Waves of the Sea, blz. 167.

93. Zeeën en deining.[1] - (Plaat I).

Het bewegende water van de watervallen of van het golven der zee maakt op ons een indruk als muziek. De aanstormende golven met hun rhythmisch zich herhalende beweging, die toch onophoudelijk weer wisselt, scheppen een vreemd gevoel van behagelijke rust zonder verveling, en roepen het beeld op van een machtig maar geordend en schoon, harmonisch leven.
H.v. Helmholtz, Tonempfindungen, 1863, *blz.* 388.

De verdere ontwikkeling der watergolven onder de invloed van de wind is vooral goed na te gaan bij de golven der zee. De echte zeegolven zijn *niet* de schuimende baren van de branding, maar die welke we van op het strand in de verte zien, en alleen van op een schip behoorlijk kunnen waarnemen.

Stellen wij ons voor dat de golven bij opkomende wind ontstaan en gegroeid zijn, en laten wij aannemen dat de wind aanhoudend blijft waaien. Capillaire rimpels vindt men nog alleen in de golfdalen of op de hellingen die naar de wind gekeerd zijn; langzamerhand verdwijnen de rimpels en de korte golfjes: *a*) omdat de grote golven hen tegen de wind beschermen en ze dus niet groeien; *b*) omdat de taaiheid van het water hen sterker dempt dan de grotere golven; *c*) omdat het plassen en spatten der grote golven hen verstoort. Tenslotte is het resultaat, dat men een aantal kortkammige *zeeën* krijgt, gesuperponeerd op een *deining* met lange kammen en grote golflengte: het typische beeld der bewogen zee. De zeeën zijn golven die voor onze ogen door de wind worden voortgedreven; de deining bestaat uit golven die elders door de wind gevormd zijn, en die zich over grote afstanden hebben voortgeplant tot buiten het windgebied.

De *zeeën* hebben volstrekt geen sinusvormig profiel meer, ze hebben een zwak gekromd golfdal maar een bijna hoekige golfberg; bij toenemende wind wordt de top een stompe hoek, bij nog sterkere wind krijgt hij een kuif van schuim. De vóór- en de achterkant der zeeën zijn niet symmetrisch. De kammen zijn kort, en hun onderlinge afstanden zijn gemiddeld ongeveer dezelfde in de windrichting als loodrecht daarop. De theorie van deze golfvormen met grote amplitude is nog zeer onvoldoende ontwikkeld; Stokes heeft aangetoond dat hun voortplantingssnelheid toeneemt naarmate ze hoger worden, en wel

1) Graf von Larisch Moennich, Sturmsee und Brandung (Bielefeld en Leipzig, 1925).

bedraagt die toeneming 20% voor zeeën die schuim beginnen te vertonen. - Al lang geleden heeft Helmholtz berekend[1] dat in 't algemeen de golflengte evenredig moet zijn met het kwadraat der windsnelheid, en het aantal golven dat bijvoorbeeld per minuut voorbijgaat omgekeerd evenredig met de windsnelheid. Op kaap Antibes, aan de Riviera, doet hij eenvoudige waarnemingen met een zakanemometer om de windsnelheid te bepalen, terwijl hij telkens het aantal golven per minuut telt (dit laatste vindt hij zeer moeilijk, hij schat de fout op tenminste 10%). Hij vindt in het algemeen dat bij toenemende wind het aantal golven per minuut afneemt, maar een streng verband is zoek, omdat de golven dikwijls afkomstig zijn uit naburige gebieden waar een andere windsterkte heerst. Een andere complicatie ontstaat ook, doordat wind van gegeven sterkte des te langer en hoger golven verwekt, naarmate hij langer waait. En tenslotte doet de wind tegelijk golven van verschillende golflengten ontstaan, die elk met hun eigen snelheid lopen. Om al die verschillende redenen is er weinig waarde te hechten aan waarnemingen in de trant van die van Helmholtz. Ook de theorie is niet houdbaar gebleken; ze leidt bijvoorbeeld tot het resultaat, dat de golven des te ronder vormen moesten hebben naarmate de wind sterker is!?

De deining bestaat uit lange kammen, niet hoog, maar met een grote golflengte. Ze vertonen geen schuimende toppen, maar zacht afgeronde vormen; hun vóór- en achterzijde zijn symmetrisch. In de verschillende oceanen heeft de deining niet dezelfde gemiddelde periode: 5,8 sec in de Atlantische Oceaan (ook aan de Nederlandse kust), 7,6 sec in de Indische Oceaan, 8,2 sec in de Grote Oceaan, en in 't algemeen des te langer naarmate de uitgestrektheid groter is en de wind een langere vrije baan heeft. Hoezeer die periode ook moge wisselen volgens het weer, toch onderscheidt de zeeman duidelijk dat zijn schip zich anders gedraagt in de ene dan in de andere zee. Aan de grootse, statige beweging van de oceaandeining merkt de reiziger dat hij het Kanaal verlaten heeft en in de Atlantiek gekomen is. Door haar grote golflengte heeft de deining ook een grote voortplantingssnelheid en geringe demping; dagen en dagen kunnen deze golven reizen zonder merkbaar zwakker te worden, en zo komen zij tot in streken waar er helemaal geen sterke wind heeft geheerst.

1) Wiss. Abh. Band **3**. Verder ontwikkeld door W. Wien.

'*Geen schouwspel is geheimzinniger voor den nieuweling, dan als de golven een voor een komen aanrollen over het windstille wateroppervlak, zich van de zeeën alleen onderscheidend door zachtere helling en afgeronde vormen en kammen*.'

(*A. Supan, Physische Erdkunde, blz*. 290. *Leipzig* 1907).

De lange en zuchtende deining ....
(*Ruskin, The seven Lamps of Architecture*, VIII, 222).

De zeeën gaan altijd langzamer dan de wind; hoe langer hij blaast, hoe meer hun snelheid tot de windsnelheid nadert zonder ze ooit te overschrijden. Daarentegen kan men dikwijls opmerken dat de deining sneller beweegt dan de wind: men moet daar echter bij bedenken dat er veel sneller winden waaien in het stormgebied van waar de deining afkomstig is, en dat ze de snelheid die ze bij haar oorsprong had blijft behouden, zelfs als ze in gebieden van betrekkelijke windstilte komt. Geen deining is sneller dan de wind die haar vormde.

De onderscheiding tussen deining en zeeën is zeer fundamenteel, en ieder waarnemer moet leren de richting van elk van de twee afzonderlijk te bepalen. De richting waarin het schuim van de golftoppen wegstuift is die van de plaatselijke wind en van de zeeën, en verschilt dikwijls aanzienlijk van de richting waarin de deining zich voortbeweegt. Maar dat wil niet zeggen dat zeeën en deining geen invloed uitoefenen op elkaar! De snelheid der zeeën nadert veel meer tot de windsnelheid wanneer de deining in *dezelfde* richting golft, dan als ze in *tegengestelde* zin of *dwars* loopt; in het eerste geval worden de golven ook opvallend regelmatiger en hoger dan in het tweede, waarin de zee een veel verwarder tafereel vertoont. Ook wordt de richting van de brekende golfkammen gewijzigd wanneer de deining dwars op de windrichting aankomt: de schuimlijnen liggen dan tussen de normaal op de windrichting en de normaal op de voortplantingsrichting der deining in. In zulke gevallen is het onjuist om als windrichting te beschouwen de richting waarin de zeeën breken (wat zeelui wel eens doen); men moet trachten zuiver waar te nemen in welke richting de zeeën zich *voortbewegen*.

Maak gebruik van een zeereis om op twee achtereenvolgende dagen de voortplantingsrichting van de deining zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, liefst op middagtijd, wanneer het bestek wordt opgemaakt en de positie van het schip bepaald wordt. Teken op de kaart beide waarnemingspunten, met de daarbij-

behorende richtingen: deze twee lijnen snijden elkaar in een punt, dat klaarblijkelijk het stormgebied aangeeft van waar de deining is uitgegaan. Men vindt dikwijls, dat de deining afstanden van 1000-3000 km heeft afgelegd. Om de tijd te berekenen die ze daarover heeft gedaan, moet de periode van de deining gemeten zijn (§ 94) en hieruit de snelheid der deiningsgolven berekend (§ 94); de deining is echter een *groep* golven, waarin telkens de voorste uitsterven en de achterste aangroeien: de individuele golven die we waarnemen zijn al lang niet meer de oorspronkelijke, de groep echter heeft zich als geheel voortbewogen met een snelheid die *de helft* is van de golfsnelheid (§ 88).

94. Metingen aan zeegolven.

Om zich een juist denkbeeld te vormen van de grootte der zeegolven, moet men ze liefst van een voldoende hoogte bekijken, bijvoorbeeld van de kommandobrug van een groot schip, anders onderschat men hun afmetingen. *Wat we meten is altijd de deining, niet de onregelmatige zeeën*. Goed opletten en nooit twee golven die niet goed gescheiden zijn als een geheel beschouwen!

Beschouw eerst de *golflengte*. Neem het ogenblik waar waarop een golf de voorsteven van het schip bereikt, en schat op welk punt van het schip de vorige golf dan al aangekomen was; de afstand tot dit merkpunt kan men daarna gemakkelijk meten. - Of men viert een hout aan een touw van de achtersteven uit, zóver dat het hout boven op de ene golf drijft als de achtersteven van het schip al op de volgende is. Deze twee methoden zijn het betrouwbaarst als het schip stil ligt, anders verstoort dit de golven door zijn beweging; als men niet loodrecht op de golven meet, moet men een cosinus in rekening brengen. - Een derde methode bestaat daarin dat men trillingstijd en snelheid bepaalt (zoals verder aangegeven) en bedenkt dat $\lambda = VT$; men krijgt uitkomsten welke met die van vorige werkwijzen overeenstemmen, als er zorgvuldig gewerkt is.

De trillingstijd meten we als de tijd die een golf nodig heeft om van de voorsteven tot het merkpunt te lopen, of van de achtersteven tot het hout dat men gevierd heeft; anders nog: het is de tijdsruimte tussen het ogenblik waarop een golf de voorsteven bereikt, en dat waarop de volgende golf aankomt. Als het schip varende is, moet gecorrigeerd worden voor zijn snelheid ten opzichte van het water. - Een betere bepalingswijze is de volgende[1)]: let op één bepaalde schuimvlek, hoe

1) Vaughan Cornish, Quart. Journ. **52**, 145.

die op en neer gaat door de zwalping van het water, en bepaal hoeveel sekunden er verlopen tussen twee hoogtemaxima. Er is aangetoond dat de wind het schuim aan het oppervlak geen groter snelheid meedeelt dan 16 cm/sec, hetgeen te verwaarlozen is. Door het gemiddelde te nemen van 10 dergelijke bepalingen - en met enige oefening! - verkrijgt u zeer nauwkeurig de trillingstijd *T*. Het oog onderscheidt weldra duidelijk de zeeën van de deining, en kan zowel van de ene als van de andere golving de periode bepalen zonder in de war te komen.

De snelheid wordt gevonden door de tijd te bepalen die een golf nodig heeft om van de vóór- tot de achtersteven te lopen. Men corrigeert weer voor de snelheid en de richting van het schip.

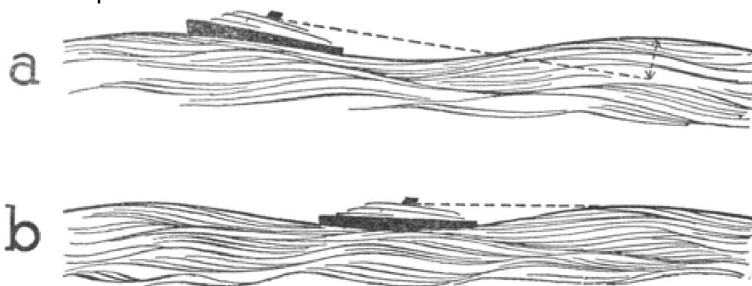


Fig. 89. *a*) Onjuiste, *b*) juiste bepaling van de hoogte der zeegolven.

De hoogte wordt dikwijls door den onervarene overschat, o.a. omdat hij geen rekening houdt met de helling van zijn schip (fig. 89). Een zuivere bepaling verkrijgt men door na te gaan van welk dek men moet kijken, midscheeps staande, om de top der golf aan de gezichteinder te zien raken, op het ogenblik dat het schip zich in een golfdal bevindt; meet de hoogte van uw oog boven de waterspiegel, of vraag de hoogte van uw waarnemingsdek aan een der officieren. Is het schip groter dan de golflengte der deining, dan geeft deze methode iets te geringe waarden.

Men heeft ook wel eens de aneroide barometer gebruikt[1]: de luchtdruk verandert 1 mm voor 10 m hoogteverschil (vgl. § 141); men ziet de naald kleine schommelingen maken naarmate het schip op en neer gaat.

Het is belangwekkend, bij zulke metingen ook telkens de windsterkte te schatten.

1) Abercromby, Phil. Mag. **25**, 263, 1888.

Tussen snelheid en golflengte kan men theoretisch een belangrijke betrekking afleiden:

(3) $$V = \sqrt{\frac{g}{2\pi}\lambda},$$

welke gelden moet voor golven die niet rechtstreeks onder invloed van de wind staan (deining), en in water dat zeer diep is ten opzichte van de golflengte[1]. Thomson's algemene formule (1) § 88 gaat daarin over, wanneer de golven zo lang zijn dat men de capillariteit verwaarlozen kan. Deze formule (3) voor 'oppervlaktegolven' is wonderbaarlijk goed in overeenstemming met de ervaring gebleken, eigenlijk beter dan de meeste andere wetten die men voor watergolven uit de theorie afleidt.

Als men in die formule de vereiste numerieke waarden invult, en overal meters en sekunden als eenheden neemt, krijgt men de volgende betrekkingen, die voor het praktische gebruik geschikt zijn.

$V = 1{,}25\sqrt{\lambda} = 1{,}56T$

$\lambda = 0{,}64V^2 = 1{,}56T^2$

$T = 0{,}80\sqrt{\lambda} = 0{,}64V$

T	***λ***	***V***
0,5 sec	0,4 m	0,8 m/sec
1	1,6	1,6
2	6,2	3,1
3	14	4,7
4	25	6,2
5	39	7,8

De betrekking (3) volgde reeds uit de oudste theorie der watergolven, die van Gerstner. Deze theorie laat ons echter hopeloos in de steek als het er op aankomt de vorm der golven te beschrijven. Volgens haar zou bij zeer grote windsterkte de hoogte der golven moeten naderen tot λ/π, en zouden de toppen vlijmscherp moeten worden.

In werkelijkheid vinden we de hoogte veel geringer t.o.v. de lengte, en de toppen veel stomper. Om aan deze en nog andere bezwaren tegemoet te komen, heeft Stokes een betere theorie der watergolven ontwikkeld, volgens dewelke de hoogte moet

1) Eenvoudige afleidingen in: Zs. phys. chem. Unterricht **43**, 11, 1930. - Müller-Pouillet **5**, 336.

naderen tot $\lambda/7$ en de tophoek tot 120°, hetgeen al in de goede richting gaat.

De waargenomen verhouding hoogte: lengte is gemiddeld 1:13 voor de golven van een vijvertje zowel als voor zeegolven tot een golflengte van 100 m. Daarboven neemt de verhouding af tot 1:26 voor de allerlangste golven.

De grootste golven welke men op de verschillende zeeën heeft waargenomen hadden volgende hoogten[1]:

Baltische Zee	3,50 m
Kanaal	5-6 m
Zuidelijke Noordzee	4 m
Noordelijke Noordzee	6 m (λ = 45 m)
Middellandse Zee	6,7 m (λ = 100 m)
Noordelijke Atlantische Oceaan	8 m
Indische Oceaan	10 m
Grote Oceaan	12 m.

Deze laatste waren de hoogste die ooit goed en volledig waargenomen zijn; hun andere afmetingen waren: λ = 400 m, V = 24 m/sec, T = 15 sec. Men ziet duidelijk hoe de golven het hoogst worden in de meest uitgestrekte oceanen (vgl. § 92). Sedertdien zijn berichten ontvangen wier zorgvuldige discussie ertoe brengt, 25 m te beschouwen als de grootste hoogte, ooit aan zeegolven waargenomen.

In de praktijk rekent men soms:
hoogte der golf in

$$\mathrm{m} = \frac{\text{windsnelheid in m}}{10}$$

, maar dit regeltje geeft niet meer dan een ruwe schatting.

> '*Als men vele jaren op zee heeft geleefd, heeft men misschien één- of tweemaal werkelijk hoge golven gezien.*'
> (*Fitzroy*)

95. Groepen van zeegolven.

De oude Romeinen dachten dat de zware golven altijd in groepen van 10 komen. Plato en de huidige zeelui beweren dat het er drie zijn (*τριχυμια*), en sommige waarnemingen

1) A. Supan, Physische Erdkunde, Leipzig 1907. - Oudere literatuur in: Mém. soc. sc. nat. Cherbourg, **17**, 265, 1873, waar zelfs golven van 13 m hoogte genoemd worden, met λ = 800 m.

schijnen dit te bevestigen[1]. Anderen spreken weer van groepjes van 5 of van 7. Het lijkt echter niet onmogelijk, dat we hier eenvoudig te maken hebben met zwevingen tussen de eigen trillingstijd van het schip en die van de golven! Daarnaast is rekening te houden met de onbewuste neiging van ieder mens, om in een onregelmatige volgorde toch steeds regelmaat te zoeken.

Enigszins verschillend hiervan zijn de groepen deiningsgolven die Von Krümmel beschrijft[2]: meestal 4-8 golven in 13-15 sec, ongeveer 10 minuten betrekkelijke rust, daarna weer een groep golven, enz.

> *De woelende golven, die de brede deining van de zee in eeuwige onrust verdelen .... zij rijzen niet overal, maar hier en daar, soms drie of vier samen, in wilde massa's, grillig en woest.*
> *J. Ruskin, Modern Painters, III, 572.*

96. Beweging der waterdeeltjes in een golf.

Gooi van het uiteinde van de pier een plankje in zee. De golven rollen voorbij, maar het plankje blijft vrijwel ter plaatse;

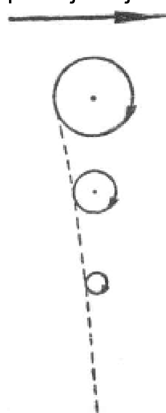


Fig. 90. Beweging der waterdeeltjes in een golf.

men zegt: de golf is dus een zich voortplantende bewegingsvorm, niet een zich voortbewegende materie (vgl. geluid). Treffend is de proef bijvoorbeeld bij ebbende zee: het plankje drijft zeewaarts, terwijl toch de golven strandwaarts bewegen.

Kijk echter nauwkeuriger: op een golfberg beweegt het plankje in dezelfde zin als de golven, in een golfdal tegengesteld. De waterdeeltjes in een golf gaan dus niet alleen op en neer, maar ook heen en weer.

Deze zelfde beweging vindt men ook onder het oppervlak, zij het ook met kleinere amplitude. Werp een natte bol papier in zee: hij zinkt langzaam, men ziet hem bij elke golf heen en weer gaan. De (overigens verouderde) theorie van Gerstner beschrijft deze bewegingen zeer aanschouwelijk: elk vertikaal vloeistofdraadje schommelt heen en weer aan zijn boveneind, terwijl het ondereind vast blijft; elk deeltje beschrijft een cirkel (fig. 90). Als echter de diepte geringer wordt en van dezelfde orde als de golflengte, verandert het karakter der beweging, doordat vertikale stromingen nabij de

1) Vaughan Cornish, Meteor. Mag. 1901, 56.
2) v. Richthofen Festschr. (Berlin 1893), 235.



PLAAT III.
Overstortende brandingsgolf (§ 97).
Naar D.W. Johnson, Shore Processes, bl. 17.



PLAAT IV.
Scheepsgolven op het meer van Thun: dwarse golven en zijgolven (§ 99).
Naar Vaughan Cornish, Waves of the Sea, blz. 351.

bodem onmogelijk zijn. De banen der waterdeeltjes aan het oppervlak gelijken nu meer op ellipsen, met de lange as horizontaal; nabij de bodem bewegen ze volgens horizontale lijntjes heen en weer. Bij zeer lange golven schuiven de vloeistofdraden vrijwel evenwijdig aan zichzelf heen en weer, zoals men dat ook bij de vloedgolf waarneemt. - Volgens de veel volmaakter theorie van Stokes schommelen de deeltjes niet alleen ter plaatse, maar is de golfbeweging begeleid door een algemene stroming met de golven mee, die vooral dicht onder het oppervlak van belang moet zijn.

97. De branding. - (Plaat II en plaat III).

'Gezien van de kust, is het krullen der brandingsgolven enigszins eentonig en eenvormig; ze schijnen elkaar op te volgen en op elkaar te gelijken, langzaam strandwaarts te bewegen, en in steeds dezelfde lijnen en vormen uiteen te vallen. Maar op een boot, al is het maar 20 meter van de kust, krijgen we een geheel andere indruk. Elke golf om ons heen lijkt groots, elk is weer anders dan de andere; en nu dat we ze van de rugzijde zien, vertoont ook ieder hunner de machtige, gestrekte, wisselende langgebogen lijnen die tegelijk snelheid en kracht uitdrukken. De brandingsgolven die een voor een naderen en breken, schijnen ons evenveel inviduen, die hun rol vervullen, vergaan, en door anderen opgevolgd worden. Maar als we begrijpen dat het geen opeenvolging van watermassa's is, maar *hetzelfde* water dat aanhoudend oprijst, uiteenspat, terugwijkt, en opnieuw vooruitrolt, in nieuwe vormen en met nieuwe woede, dan is het dat de geest der verstoring tot ons spreekt en dat we de kracht van zijn onvermoeibare razernij gevoelen'.[1)]

Bekijk de golven dicht bij het strand. Ze onderscheiden zich van de golven op hoge zee:

- *a.* door hun richting evenwijdig aan de kust;
- *b.* door hun kortere golflengte;
- *c.* door hun asymmetrische vorm: de voorzijde is veel steiler dan de achterzijde;
- *d.* de hoogte neemt langzaam toe, en wel omgekeerd evenredig met de 4e machtswortel van de diepte;
- *e.* de golven in volle zee zijn gemiddeld even lang als breed,

1) Ruskin, Modern Painters, **III**, 562.

bij het strand daarentegen hebben zich kammen gevormd die vele malen langer dan breed zijn;

f. de brandingsgolven gaan tenslotte overstorten, en gaan over in een vooruitschuivende waterplaat: een ‘enkelvoudige golf’.

Deze typische wijzigingen moeten niet toegeschreven worden aan ‘wrijving’ van de golven tegen de bodem; integendeel, de branding ontstaat juist in weerwil van de wrijving, als gevolg van de snel afnemende diepte en de vertraging welke de golf daardoor ondergaat. Wanneer de diepte H van de orde van de golflengte wordt, geldt (§ 91):

$$V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}}$$

; de invloed van de bodem is dus slechts in zeer ondiep water merkbaar, want voor *H = λ/2* is de uitdrukking

$$\sqrt{\operatorname{tgh} \frac{2\pi H}{\lambda}} \text{ nog } 0{,}95$$

[1].

De verklaring van *a.* is al hoger gegeven (§ 91); voor *b.* volgt ze onmiddellijk uit de beschouwing van twee opeenvolgende golven, waarvan die het langzaamst loopt welke het dichtst bij de kust is; *c.* ontstaat doordat de golfberg (waar 't water dieper is) het in snelheid wint van het golfdal (ondieper water); *d.* is nodig, wil de energie van de aankomende golven bewaard blijven, ook al neemt hun diepte af; *e.* moet aldus verklaard worden, dat er een keuze plaats grijpt onder alle golven en golfkammen die in hoge zee naast elkaar voorkomen: de korte kammen breken al zodra het water een weinig ondiep wordt, de lange kammen breken later en zijn de enige die dicht bij het strand nog overblijven. Men zou een ogenblik kunnen onderstellen, dat van een lange en een korte kam, die in diep water even hoog zijn, de lange kam in ondiep water het hoogste wordt en daardoor meer opvalt; maar dat is niet zo: beide groeien in dezelfde mate[2].

Volgens Scott Russell begint het overstorten, zodra de diepte *a* gelijk wordt aan de hoogte *h* der golf (fig. 91). Anderen zijn het daar niet mee eens en geven $a = \frac{2}{5}h$, $a = \frac{3}{5}h$, zelfs $a = 2h$; of ze beweren dat *h* gelijk moet zijn aan de diepte die het water hebben zou, indien de golven bedaard waren. Doe eigen waarnemingen als u in zee gaat baden! Weldra zal u de invloed van de wind blijken: bij zeewind zijn er verscheidene rijen brekende golven en hun schuimlijnen tekenen zich reeds ver van de kust af; bij landwind breken de golven slechts als ze vlak bij de kust

1) Metingen ter controle van deze formule in haar algemene vorm schijnen nog niet geschied te zijn.
2) H. Jeffreys, Phil. Mag. **48**, 44, 1924.

zijn en hun kuif al goed gevormd is, met luid geraas overstortend.[1] Van groot belang is ook de helling van het strand, of eventuele terrassenvorming van de zeebodem; waarschijnlijk is aldus te verklaren dat men branding in het Kanaal heeft waargenomen bij 200 m diepte (Airy), en tussen de Faroër en de Shetlands bij 300 tot 500 m diepte (Tizard)! Langs een groot gedeelte van ons strand ziet men van op de dijk of van uit een vliegtuig hoe de branding een viertal blanke schuimlijnen veroorzaakt,

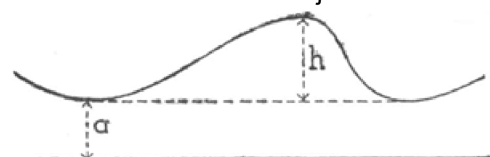


Fig. 91. Kritische verhouding *a*/*h* waarbij het overstorten van een golf begint.

die evenwijdig aan de kust lopen. Dit is natuurlijk toe te schrijven aan de achtereenvolgende rijen zandbanken die onze kust omzomen.

Let op een overstortende golf. Het overstorten begint in één punt van de golfkam en plant zich van daar over de gehele kam voort. - (Plaat III).

En langs haar groene rug loopt onbestendig schuim
- Een witheid - langzaam tegenstribbelend voort.
Keats, Endymion, II, 350.

'Er is in de brandingsgolven een onverzoenbaar mengsel van wildheid en vormenstrengheid. Hun hol oppervlak is aangegeven door evenwijdige lijnen, als die van het gladde wateroppervlak bij een molenstuw, en het vertoont wonderlijk ingewikkelde overgangen van weerspiegeld en doorgelaten licht, terwijl zijn kromming toch noodzakelijk van wiskundige zuiverheid en precisie is; maar aan de top van deze ronding, waar de golf omknikt, is er een plotselinge slapheid en meegeven, het water zwaait en springt langs de graatlijn als een ketting die geschud wordt, en de beweging loopt van het ene naar het ander deel als langs het lichaam ener slang. Dan gaat de wind op die uiterste rand inwerken, en in plaats van hem zijn eigen, natuurlijke baan te laten volgen, houdt hij hem zwevend, en drijft hem terug, of schraapt hem af en drijft hem in zijn geheel voort. Zodat het schuim aan de top een voortdurende overgang is tussen vormen die door hun eigen massa worden voortgestuwd; en vormen die weggeblazen en weggevoerd worden, waarvan het gewicht overwonnen is'.[2]

1) Vaughan Cornish, Waves of the Sea, hoofdstuk II.
2) Ruskin, Modern Painters, III, 561.

Merk op hoe het fijne zand in wolkjes onder de overstortende golfkam opwervelt! Als de golf bijna tot stilstand gekomen is, ziet men hoe het water aan de achterzijde al begint terug te vloeien terwijl de kop nog vooruit loopt. Het water dat zijn snelheid verloren heeft, stroomt terug langs de bodem en veroorzaakt een zeewaartse 'zuiging', die meestal de voornaamste faktor is waardoor de nieuw aanstormende golven geremd worden.

98. Golvengeklots.

Waar de golfslag tegen een dijk aankomt of tegen de muur van een kade, worden de golven teruggekaatst, en ziet men de heengaande met de terugkerende golf interfereren. Soms versterken ze elkaar, andere malen verzwakken ze elkaar: de 'lopende golf' gaat in een 'staande golf' over; de amplitude zou in het gunstigste geval twee maal zo groot als die van de lopende golf kunnen worden.

In werkelijkheid is het verschijnsel veel onregelmatiger. De golven komen niet met constante snelheid en golflengte aanlopen; daarenboven wordt het water bij de kade in 't algemeen ondieper, wat al op zichzelf een toenemen der amplitude veroorzaakt en het breken van de golven, die op dat ogenblik met verhoogd geweld vooruitschieten. Zo kan men de geweldige hoogte begrijpen tot dewelke de zee kan opstormen tegen klippen en havenhoofden.

Men rekent in de praktijk dat golven van *h* meter hoogte bij het breken een drukking uitoefenen van 50 h^2 kg/m^2. Het is de moeite waard na een storm te zoeken naar de uitwerkingen van dat golvengeweld en de uitgeoefende kracht te schatten. Krachten van 5000 kg/m^2 komen zeker voor.

99. Scheepsgolven.[1)] - (Plaat IV).

> *Van alle mooie vormen van watergolven zijn de scheepsgolven wellicht de allermooiste, als men de schoonheid van zulke mooie dingen vergelijken kan.*
> *W. Thomson, t.a.p.*

De scheepsgolven bestaan uit twee groepen: de *zijgolven* AU_1, AU_2, AV_1, AV_2,,,,,; en de *dwarse golven* V_1U_1, V_2U_2,,,,, (fig. 92*a*). Even duidelijk als men de eerste soort ziet, even moeilijk ontdekt men de tweede. Het geheim bestaat eenvoudig daarin, *dat men op een brug moet gaan staan* of althans zoveel mogelijk in de lengterichting van het vaarwater kijken; we

1) W. Thomson, On Ship Waves (Popular Lectures, 1887). - Phil. Mag. **11**, 1, 1906 = Papers, **4**, 394.

zien nml. alle golven beter wanneer we loodrecht op hun kammen kijken. Het is een wondermooi schouwspel, een snelvarend schip te zien aankomen van op de brug over een breed, rustig water (Amstelbrug te Amsterdam!), gevolgd door een statige trein van tientallen dwarsgolven.

Het eenvoudigste stelsel scheepsgolven ziet men als men een houten bal over een breed wateroppervlak voorttrekt, of als een eend snel aan 't zwemmen is (een zwaan is al te groot om een zuiver golvenpatroon te geven!). Ook dan bemerkt men zijgolven en dwarsgolven (⊥ op de kammen kijken!). De spitse uiteinden U_1, U_2, ..., V_1, V_2, ..., liggen op de rechte lijnen AB, AC, die in overeenstemming met de theorie een hoek van 19°½ met de bewegingsrichting

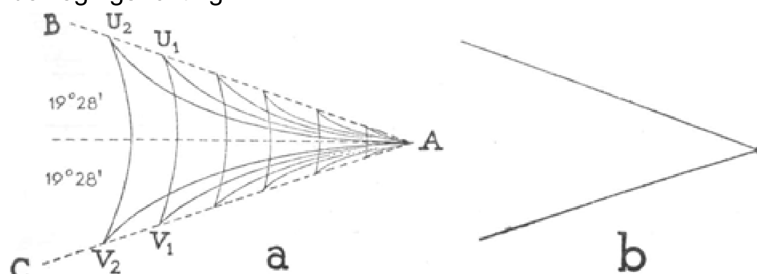


Fig. 92. Schematisch patroon van de scheepsgolven achter één storingspunt. *a*) Waaierpatroon de zijgolven, tengevolge van de afhankelijkheid der voortplantingssnelheid van de golflengte. *b.*) Vereenvoudigd patroon voor het (denkbeeldige) geval dat de oortplantingssnelheid niet van de golflengte zou afhangen; dit wordt benaderd als de snelheid van de boot groter is dan $\sqrt{gH}$.

vormen; die uiteinden komen overeen met de typische ‘stoombootgolven’ waarop men de roeibootjes angstig op en neer ziet schommelen. Volgens de theorie zouden ze ‘oneindig hoog’ zijn, maar de taaiheid van het water vereffent het gehele patroon enigszins en rondt het af; als schepen zulke golven maken, kan men nog aan het schuim de ‘would be infinities’ (Thomson) herkennen. Tracht op te merken dat de zijgolf en de daarbijbehorende dwarsgolf niet in dezelfde phase zijn. - Indien de voortplantingssnelheid van watergolven niet afhing van de golflengte, zouden de slanke gebogen lijnen van de zijgolven zich herleiden tot twee rechten (fig. 92*b*); de scheepsgolven zouden er dan uitzien zoals de drukgolven in de lucht om een vliegende kogel, die men dikwijls gefotografeerd heeft.

De vergelijking der scheepsgolven kan in de volgende eenvoudige vorm neergeschreven worden:

$$x = a\frac{1 + 2t^2}{(1 + t^2)^{3/2}},\ y = a\frac{t}{(1 + t^2)^{3/2}}$$

. De richting waarin het schip beweegt is die van de *x*-as. Geef een vaste waarde aan *a*, en laat *t* alle mogelijke waarden aannemen: *x* en *y* doorlopen de kromme lijm AU_2V_2A; enz. De hoek van 19^o½ is bg sin ⅓.

Bij een schip werken vóór- en achtersteven als twee storingsmiddelpunten, een drukpunt en een zuigpunt, die elk een dergelijk patroon als fig. 92*a* veroorzaken. Daardoor is het geheel niet altijd eenvoudig te overzien: het verschil tussen zij- en dwarsgolven is duidelijk genoeg, eigenlijk veel mooier dan bij de bol die over het water beweegt; maar men onderscheidt niet altijd goed welke van ieder der twee stevens uitgaan. De achtersteven verstoort dikwijls de golven die hij maakt, doordat hij teveel wervels vormt; men ziet dan vooral het golvenstelsel van de voorsteven. Heeft het schip een zuiverder visvorm, dan zijn er minder wervels, en de twee stelsels golven kunnen op bepaalde wijze invloed op elkaar uitoefenen, al naar de lengte van het schip en de snelheid waarmee het vaart; de weerstand die het schip ondervindt hangt in belangrijke mate van deze interferenties af. Kenmerkend voor een schip is ook de vorm van de voorste zijgolf, wáár zij tegen de voorsteven opspringt, hoe zij breekt, en dit zowel bij langzame als bij snelle voortbeweging van het schip. De golven aan de achtersteven moeten zich beginnen te vormen iets vóór het punt, waar het evenwijdige middenschip begint te versmallen.

In een kanaal stoort de terugkaatsing der golven door de oevers altijd heel erg. Maar in een rustig water met wijd oppervlak kan men soms fraaie interferentieverschijnselen zien, dikwijls het best als men van op een hoogte naar beneden kijkt:

a. tussen de zijgolven van vóór- en achtersteven;
b. tussen de zijgolven van een sleepboot en die van het gesleepte schip;
c. tussen de zijgolven van twee schepen die elkaar in tegenovergestelde richting voorbijvaren.
d. In een bepaald geval heeft men opgemerkt, dat elk der zijgolven, als zij brak, in een reeks evenwijdige schuimbanden uiteenviel; men kon tot 6 van die banden waarnemen[1)].

Let op een schip dat zich in een kanaal statig in beweging zet. Naarmate het verder vaart, ontwikkelt zich achter het schip een trein van plechtige golven, die langer en langer wordt. In een diep kanaal loopt het einde van de golftrein met de *halve*

1) Nat. **128**. 838, 1931.

snelheid van het schip, de golftrein wordt dus voortdurend langer en langer. Elke golf echter loopt met de volle snelheid van het schip, de waarnemer in het schip ziet die bepaalde golf altijd op dezelfde plaats, maar in het geheel van de groep komt ze meer en meer vooruit. Er is hier dus weer een verschil tussen *golfsnelheid* en *groepsnelheid* (§§ 86, 88).

De golflengte der scheepsgolven is bepaald door een eenvoudige voorwaarde: ze moeten juist zó lang zijn, dat ze gelijke tred met het schip houden. De dwarse golven moeten dus dezelfde snelheid V als het schip hebben; de zijgolven die een hoek α met de richting van het schip vormen, hebben een kleiner snelheid: als het schip een afstand V aflegt, komen zij vooruit over $V \sin \alpha$ (vergelijk § 89). Aangezien nu de golflengte van gravitatiegolven in diep water evenredig is met het kwadraat hunner snelheid, moeten de golflengten der zijgolven kleiner zijn dan die van de dwarsgolven in de verhouding $\sin^2\alpha$, en moeten alle scheepsgolven evenredig met het kwadraat van de snelheid van het schip groeien. Mocht een dwarsgolf bijvoorbeeld er ooit over denken om zich een iets kortere golflengte te permitteren, dan zou ze langzamer dan het schip bewegen en er zich van verwijderen, zodat weer vanzelf de golflengte zou toenemen en dus ook de snelheid. Zo stellen alle golven zich automatisch op de snelheid van het schip in.

Uit de golflengte λ der dwarsgolven krijgt men het eenvoudigst een indruk van de snelheid van het schip. Volgens formule (3) is immers

$$V = \sqrt{\frac{g}{2\pi}\lambda} = 1{,}2\sqrt{\lambda}$$

(als alles in m en m/sec wordt uitgedrukt). - Vgl. § 60.

Waarvoor wordt de arbeid van een varend schip gebruikt? Vooreerst is het water geen ‘ideale vloeistof’, maar een vloeistof met een zekere inwendige wrijving, een zekere taaiheid, zoals alle vloeistoffen trouwens die we kennen; het gevolg is: 1) een zekere wrijving van het water langs de kanten van het schip, die ongeveer 50% van de arbeid verbruikt; 2) de vorming van wervels in het zog van het schip, waarvoor men 10% rekent. 3) Daarnaast echter heeft het schip nog een weerstand te overwinnen die er net zo goed zou zijn als het water werkelijk een ideale vloeistof was, en die de overige 40% van de arbeid verbruikt: er is nml. arbeid nodig voor het vormen en voortdurend vergroten van de golftrein die het schip achter zich aan sleept. De inwendige wrijving speelt hier tenslotte toch weer een rol, want zij maakt dat de golftrein in werkelijkheid niet oneindig

lang wordt, maar dat de golven langzamerhand gedempt worden. Het eindresultaat is natuurlijk altijd hetzelfde: dat de arbeid van het varende schip tenslotte dient .... om het water van het kanaal of van de zee een weinig warmer te maken!

De energie van watergolven is evenredig met het kwadraat hunner hoogte. Naarmate dus een schip sneller vaart en hoger golven opwekt, neemt de weerstand snel toe: eerst met het kwadraat van de snelheid, weldra met een hogere macht. Als echter het water niet zéér diep is, komt er op een gegeven ogenblik een wijziging in de weerstandswet, welke hierna uiteengezet zal worden.

In *ondiep water* nemen de scheepsgolven een gewijzigde vorm aan; de hoek van 19°28' neemt toe naarmate het schip sneller vaart, en het patroon verandert geleidelijk in een enkelvoudige golf.[1] Wanneer een motorboot evenwijdig aan de kust vaart, worden de dwarse golven hoger aan de kant waar de diepte het geringst is.[2]

'*Als ik, na dit wellicht vrij droge wetenschappelijke betoog, u nog een enkel woord kan zeggen dat ieder van u ertoe brengt zijn ogen te gebruiken bij het kijken naar schepen, boten, eenden en eendjes, met verschillende snelheden over het water bewegend, en deze mooie golfverschijnselen waar te nemen, dan denk ik dat u iets voor de rest van uw leven zult gewonnen hebben, ook al mocht u zich niets meer herinneren van mijn lezing*.'
(*W. Thomson, On Ship-Waves, slot*)

100. De enkelvoudige golf[3] (Wanderwelle, solitary wave, onde solitaire). - (Plaat II).

Eeuwen lang heeft men gedacht dat golven altijd in lange reeksen moesten voorkomen. Pas in 1837 bemerkte Scott Russell toevallig, op een wandeling, een geheel andere soort vloeistofbeweging: een *enkelvoudige* waterverheffing die zich met grote snelheid voortbewoog. Een enkelvoudige golfberg kan zich over grote afstanden ongestoord uitbreiden, een enkelvoudig golfdal verandert daarentegen weldra van vorm en is onbestendig.

Bij onze waarnemingen over de snelheid van watergolven in ondiep water en over de branding, hebben we gezien dat de golven steeds langzamer gaan lopen indien de diepte *H* van het water geringer wordt dan de golflengte (§ 97). Voor zeer

1) T.H. Havelock. Proc. R. Soc. **81**, 398, 1908.
2) E.T. Hanson, Proc. R. Soc. **111**, 518, 1926.
3) Een populaire uiteenzetting door Weinstein in: Naturwiss. **21**, 383, 1929.

ondiep water, of zeer lange golven (wat op hetzelfde neerkomt) is de grootst bereikbare snelheid (§ 91):

(4) $V = \sqrt{gH}$;

deze grenssnelheid is voor alle golflengten dezelfde.[1)]

Maar wat gebeurt er dan, als we toch een voorwerp met groter snelheid dan die grens door het water trekken? In water van 0,20 m diepte ligt de grenssnelheid bij 1,14 m/sec, dus bij een gemakkelijk bereikbare snelheid. Beweeg een stok zo snel mogelijk door ondiep water: *er vormen zich geen dwarsgolven meer*, het zog achter de stok is glad en effen, alleen de zijgolven zijn er, en ze krullen hoog op aan beide kanten van het bewegende 'vaartuig'. Metingen hebben bewezen dat de kracht nodig voor het voortbewegen van schepen ineens kleiner wordt als men de grenssnelheid overschrijdt: want dan moet er geen arbeid meer geleverd worden om een golvenpatroon achter het schip te vormen. Het schip wordt half uit het water getild en vaart op de top der enkelvoudige golf. Deze ontdekking werd eigenlijk gedaan

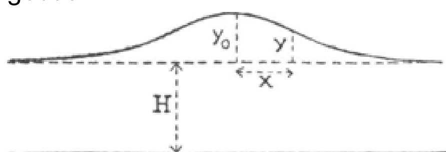


Fig. 93. Profiel der enkelvoudige golf.

door een paard, het paard van de trekschuit tussen Aberdeen en Glasgow, dat toevallig op hol ging, en zijn werk veel gemakkelijker bij die grotere snelheid bleek te verrichten!

De vorm der enkelvoudige golf wordt gegeven door de vergelijking

$$y = y_0 \operatorname{sech}^2 \left[\frac{x}{2} \sqrt{\frac{3y_0}{H^2(H + y_0)}} \right].$$

Haar snelheid is $\sqrt{g(H + y_0)}$.

De golf breekt wanneer $y_0 > 0{,}78\,H$.

Verder moeten we enkelvoudige golven overal zoeken waar *zeer ondiep* water een *grote snelheid* krijgt; zodra $V > \sqrt{gH}$ gaat zich het water in enkelvoudige golven rangschikken. Als de baren aan het strand breken, gaat elke baar over in een vlakke plaat water, waarvan een schuimende rand over het strand loopt (Plaat II). Soms ziet men twee dezer golven over elkaar schuiven of elkaar kruisen. Als de stoep geschrobd wordt en het water der waterleiding daarover stroomt, verdeelt het zich in dergelijke enkelvoudige golven, terwijl toch de toevoer door de kraan

1) Eenvoudige afleiding in Müller-Pouillet, V, 340.

voortdurend even snel is. Men ziet het verschijnsel al, wanneer een emmer water over de vlakke straatstenen wordt uitgegoten. De snelheid van een dergelijk 'trapje' in het wateroppervlak, op de grens tussen een laag van grotere dikte H_1 en een laag van geringe dikte H_2, wordt gegeven door de uitdrukking:

$$V = \sqrt{\frac{gH_1}{H_2} \cdot \frac{H_1 + H_2}{2}}.$$

Schat de waarde die men moet verwachten voor de platen water waarin de branding der zee zich oplost, en vergelijk met de door uzelf gemeten snelheid.

Een oppervlakkige gelijkenis met het varen op de top der enkelvoudige golf zou men kunnen zoeken in het *planeren* van zeil- en motorboten[1]. De echte 'glijboten' hebben een platte bodem en een achterschip van geringe diepgang; bij voldoende snelheid stellen ze zich met de vóórsteven schuin omhoog, en worden door de geweldige druk van het hun tegemoetstromende water bijna uit de vloeistof opgelicht, zodat de weerstand zeer verminderd wordt. Het water glijdt grotendeels onder het schip door, een kleiner gedeelte van de stroom buigt om en spuit van onder de vóórsteven schuin opwaarts naar voren. Reeds uit deze laatste trek ziet men welk een typische bewegingsvorm het planeren is; ook bemerke men, dat planeren des te gemakkelijker tot stand komt naarmate het vaarwater dieper is, terwijl een enkelvoudige golf zich op diep water niet eens vormen kan. Het planeren en het varen op de top der enkelvoudige golf zijn dus twee principiëel verschillende bewegingsvormen.

101. Stromend water dat in een reeks van enkelvoudige golven beweegt.[2] - (Plaat V).

Het mooist zien wij deze merkwaardige verschijnselen bij sterk hellende goten of kanalen, die dikwijls door technische bedrijven voor waterafvoer gebruikt worden en waarin een ondiepe waterlaag stroomt. In het eerste gedeelte is de waterstroom geheel gelijkmatig, een bewijs dat de toevoer ononderbroken is (centrifugaalpomp b.v.). Maar nadat het water voldoende snelheid gekregen heeft, verdeelt het zich '*vanzelf*' in een aantal trappen: elk daarvan is een enkelvoudige golf, zeer vlak aan de achterzijde, steil aan de vóórzijde, naar dewelke zij zich beweegt. Die eigenaardige golfvorm ontstaat, doordat in dit ondiepe water de snelheid van de golfberg reeds zeer merkbaar groter is dan die van het golfdal: de golf wordt dus steeds steiler. De eigenlijke schuimende golfberg is ongeveer 7 maal zo breed als het water diep is.

Werp een snippertje papier op het water: de golf haalt het

1) H. Wagner, Proc. Intern. Congress of Appl. Mech. **4**, 126, 1934.
2) Nat. **30**, 1883. - Ph. Forchheimer, Sitz. Akad. Wien, **112**, 1697, 1903. - Vaughan Cornish, Waves of the Sea, hoofdstuk III.

in, zij beweegt dus sneller dan de stroom; noem *V* de snelheid *van de golf*. - Daar waar een dergelijke trappengolf uitstroomt ziet men bij elke golfberg die aankomt hoe het water ineens overvloediger en met groter sprongwijdte in een gulp uit de monding der pijp komt: blijkbaar heeft het een grotere snelheid bij de golfberg dan bij het golfdal.

Wij noemen de stroomsnelheden *van het water* in de golfberg V_1, in het golfdal V_2. Laten we een ogenblik in gedachte aan de gehele waterstroom een snelheid *V* geven in tegengestelde richting van de stroming: de golven staan nu voor ons stil, maar het water stroomt langzaam stroomopwaarts, met snelheid $V-V_1$ in de golfberg, $V-V_2$ in het golfdal. Door elke doorsnede moet er evenveel water stromen; als dus H_1 de diepte is in de golfberg, H_2 in het golfdal, moet

(1) $H_1(V-V_1) = H_2(V-V_2)$.

Beschouw nu weer het stromende water zoals het is. Volgens § 75 mogen we schrijven: $V_1 = c\sqrt{H_1 J}$, $V_2 = c\sqrt{H_2 J}$. Door invullen in (1) komt er:

$$V = c\sqrt{J} \cdot \frac{H_1^{3/2} - H_2^{3/2}}{H_1 - H_2}$$

= voortplantingssnelheid van de golven (t.o.v. den rustenden waarnemer).

Beproef die formule aan de ervaring te toetsen! Haal *c* uit de tabel § 75, meet zo goed mogelijk H_1 en H_2 met een latje, schat het verhang *J* en bereken *V*. - De orde van grootte komt wel goed uit, maar een werkelijke overeenstemming kan men niet verwachten, omdat *c* voor zulk ondiep water niet de normale waarde heeft. Misschien kunt u *c* bepalen uit het eerste gedeelte van de helling, waar het water zich nog niet in golven heeft verdeeld.

De verschillende golfkammen hebben niet precies dezelfde snelheid, want in de hoogste is het water het diepst en de golfsnelheid het grootst: zij halen de kleinere in en versmelten ermee. Vandaar ook dat de afstanden tussen de golven zeer ongelijk zijn (volmaakt anders dan bij de gewone golfbeweging!). Aan lange leidingen kan men het aantal golven per minuut op verschillende punten van de helling bepalen, en ook de schommelingen in golflengte.

Meer dan eens ziet men het water uit lange pijpen in onregelmatige gulpen uitstromen; het is dan niet mogelijk binnen in de buis te kijken, maar als werkelijk de toevoer regelmatig is, en de buis slechts met een ondiep laagje water bedekt, kunnen we veilig aannemen dat zich hier ook een trap van enkelvoudige golven gevormd heeft.

Veel watervallen zijn om dezelfde reden pulserend. Houd uw hand in het vallende water: u voelt de opeenvolgende stoten. Kijk naar de weerspiegeling van het licht aan het oppervlak

van het vallende water: u ziet er golfjes over lopen. Dikwijls hoort men ook een pulserend geruis. Bij Gasselternijeveen, waar de weg naar Gasselte de Hunse kruist, kan men zulk een watervalletje waarnemen, dat ongeveer 6 maal in de sekunde pulseert.

102. Demping van zeegolven door olie.

Een beroemd volksgeloof, dat men al vermeld vindt in Plinius, en dat tenslotte gebleken is in hoofdzaak juist en wetenschappelijk verklaarbaar te zijn!

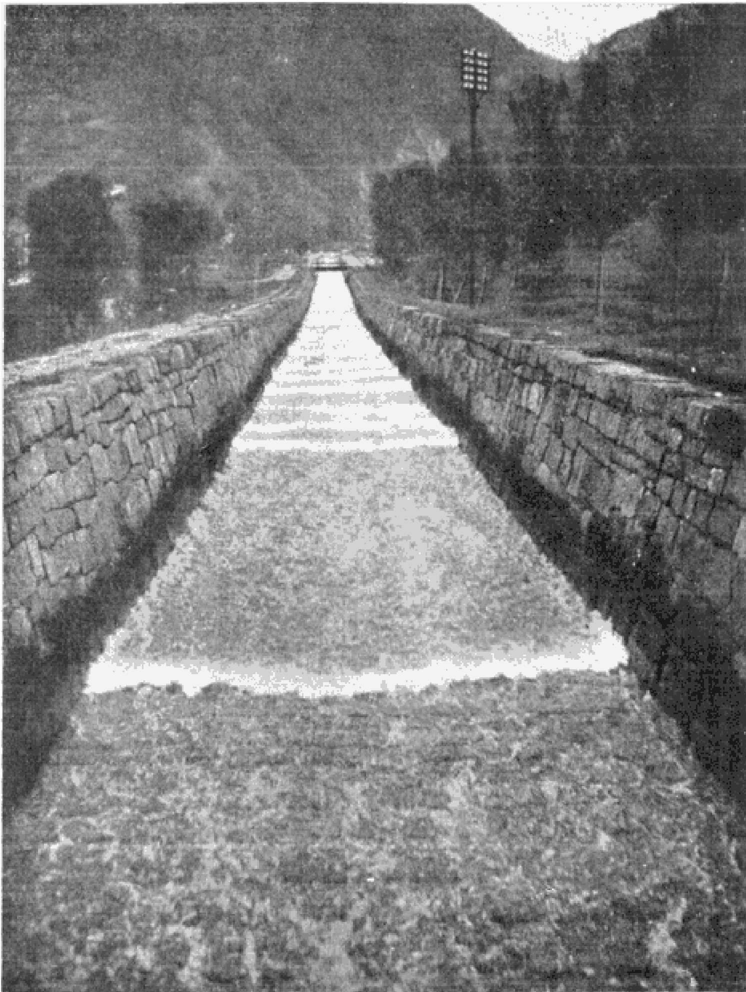
Benjamin Franklin vertelt[1)]:

'Ik geloof, dat het in de laatste tijd al te zeer mode is geworden, de kennis van de oude volkeren te onderschatten. Ook zijn de intellectuelen teveel geneigd de wetenschap van den gewonen man te kleineren. Het glad maken van golven met olie is een voorbeeld van beide.

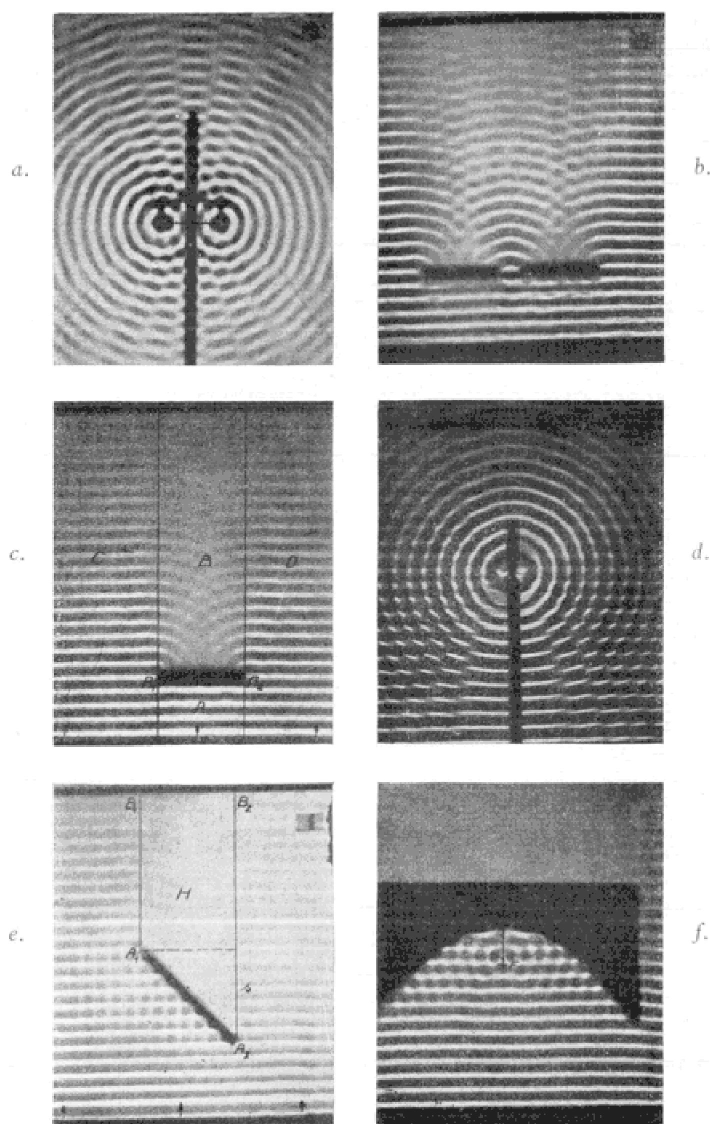
.... In 1757 bevond ik mij op zee met een vloot van 96 zeilen, met bestemming voor Louisbourg; ik merkte op dat het vaarwater achter twee der schepen merkwaardig effen was, terwijl het achter al de andere door de frisse wind gerimpeld werd. Getroffen door dit verschil, wees ik het tenslotte aan den kapitein, en vroeg hem de verklaring ervan. "De koks, zei hij, zullen wel juist hun vettig water door de spuigaten uitgegoten hebben, en dit heeft de zijkanten van de schepen een weinig vet gemaakt;" en hij gaf mij dit antwoord op ietwat achteloze wijze, alsof hij mij iets vertelde dat iedereen overigens wel wist. Ik geloofde in 't eerst niet veel van zijn verklaring, ook al kon ik geen andere bedenken. Maar, mij herinnerend wat ik vroeger bij Plinius had gelezen, besloot ik enige proeven te nemen over de invloed van olie op het water, zodra ik gelegenheid daartoe zou hebben.

.... Tenslotte, toen ik mij eens te Clapham bevond, waar er in het park een grote vijver is, en het water daarvan sterk door de wind golfde, haalde ik een flesje van een oliestel, en goot een weinig daarvan op het water. Ik zag hoe de olie zich met verrassende snelheid over het wateroppervlak uitspreidde; maar het deed de golven niet bedaren; want ik had het eerst aan de lijzijde van de vijver gegoten, waar de golven het grootst waren[2)], en de wind dreef mijn olie naar de kant terug. Ik begaf mij toen aan de windzijde, waar de golven zich vormden; en daar veroorzaakte de olie (alhoewel ik niet meer dan een theelepeltje er van gebruikte) een onmiddellijke kalmte over een

1) Philos. Trans. **64**, 447, 1774.
2) Vgl. § 92.



PLAAT V.
Reeks van enkelvoudige golven in een ondiep, sterk hellend waterkanaal (§ 101).
Het water stroomt ons tegemoet; diepte ca. 7 cm, helling tenminste 7%.
Naar Vaughan Cornish, Waves of the Sea, blz. 303.



PLAAT VI. Voortplanting van watergolven. *a*. Spiegelproef van Fresnel. - *b*. Buiging door een smalle spleet. - *c*. Buiging door een schermpje. - *d*. Verstrooiing van evenwijdige golven door een resonator. - *e*. Terugkaatsing van evenwijdige golven door een vlakke spiegel. - *f*. Een holle spiegel vereenigt evenwijdige golven in zijn brandpunt. - Vgl. § 110.
Naar L. Heck. Jahrb. f. drahtl. Telegraphie, **34**, 121, 1929.

oppervlak dat eerst verscheidene vierkante meters besloeg en zich dan verbazend uitbreidde, zodat het tenslotte de lijzijde bereikte, en dat gehele gedeelte van de vijver, wellicht een halve morgen groot[1], zo glad als een spiegel maakte.

Voortaan zorgde ik ervoor, telkens als ik buiten ging wandelen, een weinig olie mee te nemen in de bovenste holle geleding van mijn bamboe wandelstok, om daarmee de proef te herhalen als er gelegenheid zou zijn; en ik vond dat zij onveranderlijk slaagde.'

Franklin kwam ook op de gedachte, een papiertje in de vorm van een komma met olie te drenken, en het op het water te werpen. De komma gaat aan het draaien als de olie snel van de punt wegstroomt en zich uitbreidt. - Deze proef lukt *niet* in een schotel water, een groot oppervlak is onontbeerlijk; want zodra het zich uitbreidend olieoppervlak het gehele water overdekt, houdt de uitstroming op.

Een poging om de golven van de branding te stillen mislukte in hoofdzaak, alhoewel de schuimvorming door de olie ophield.

Franklin verzamelde een groot aantal berichten over de werking van olie op de zeegolven. Plinius de Oude vermeldt dat de zeelui er gebruik van maakten, en ook na die tijd vindt men dergelijke vermeldingen telkens weer, nu hier, dan daar. Duikers gebruiken een weinig olie om het oppervlak effen te maken en er beter doorheen te kunnen zien. Bijna altijd is het kielzog der schepen gladder dan de zee daarnaast, hetgeen te wijten is aan de kleine hoeveelheden olie welke stoom- of motorschepen voortdurend in het water brengen; schepen die pas geteerd zijn hebben een effener vaarwater dan andere. De vissers weten dat plaatsen waar zich scholen vissen ophouden, aan het gladdere wateroppervlak kenbaar zijn: hetzij omdat de vissen een weinig van een olieachtige stof in 't water brengen; of omdat ze bij voorkeur gebieden opzoeken waar veel drijvende zeediertjes en mikroskopische plantjes voorkomen (het *plankton*), en die daardoor met een vettig oppervlaktelaagje bedekt zijn.

Nog voortdurend komt het voor dat schepen door het gebruik van olie van de ondergang gered worden.[2] Men hangt een zak buitenboord, waarin kleine gaatjes geprikt zijn, zodat de olie er langzaam uitstroomt. Een liter olie per uur is voldoende om de zee om een varend schip te doen bedaren.

Men kan gemakkelijk zelf proeven nemen in de aard van die van Franklin, zodra er eens een stormachtige dag komt. U zult

1) 1 morgen = 4000 m^2 ongeveer.
2) Zie bv. Ann. Hydr. **24**, 136, 1896.

dan merken dat de oliehuid *wel* de capillaire rimpels en het schuim doet verdwijnen, maar *niet* de gravitatiegolven. Het is dan ook een sprookje dat olie de zee geheel vlak zou maken: ze verhindert de vorming der zeeën en hun overstorten, maar grote, gladde deiningsgolven blijven op en neer gaan. Als u experimenteert bij het baden in zee, kunt u waarnemen dat de olie evenmin invloed heeft op de brandingsgolven; hier immers wordt het overstorten niet veroorzaakt door de werking van de wind op het oppervlak, maar door het ondieper worden van de zee.

De werking van de olie schijnt aan twee effekten te wijten[1]. 1) De oliehuid oefent een zeer merkbare weerstand uit tegen samendrukking; de werking van de wind, die anders van plaats tot plaats verschilt door de grote grilligheid der luchtstroming, wordt daardoor gelijkmatiger over het oppervlak verdeeld, meer vereffend. - 2) De oliehuid dempt door haar taaiheidsweerstand alle rimpels die zich zouden hebben kunnen vormen. Het belang dat deze tweede factor heeft zal nog overtuigend blijken bij de waarneming der rimpels, door regendruppels veroorzaakt (§ 104).

Taaie oliesoorten zoals raapolie werken het best. Paraffineolie en petroleum werken vrij slecht, tenzij wanneer men ze met ⅓ tot ¼ raapolie mengt. De gunstiger eigenschappen van vetoliën zijn terug te brengen tot het feit, dat hun molekulen polair zijn en zich loodrecht op het oppervlak instellen. Zeepwater, gemaakt door 2 tot 10% groene zeep in regenwater op te lossen, werkt tenminste zo goed als olie, want de zeepmolekulen zijn ook polair; voor onze proeven is echter een bezwaar, dat de laag helemaal niet zichtbaar is, en haar aanwezigheid dus alleen door de demping der golfjes bemerkbaar wordt, terwijl de oliehuidjes althans heel zwak de weerspiegeling van het oppervlak wijzigen. Terpentijn is zeer bruikbaar voor proefjes in een vijver, daar het door zijn mooie interferentiekleuren goed zichtbaar is, en daarenboven na enige tijd verdampt, zodat men opnieuw in dezelfde vijver kan experimenteren.

Met een eenvoudige proef van die aard bepaalde Forel de dikte van het oliehuidje: 20 cm^3 olie deden de rimpelingen van het water verdwijnen over een gebied van 4000 m^2; de laag was dus 5.10^{-7} cm dik. Dit is de grootte van slechts twee molekulen olie, de laag is inderdaad twee molekulen dik. - Zo kan dus de afmeting der molekulen door een waarneming in 't vrije veld gevonden worden.

1) Adams, The Physics and Chemistry of Surfaces, p. 91 (Oxford, 1930).

103. Demping van zeegolven door andere oorzaken.

Men beweert dat zeewier, afval, zaagsel, schoorsteenroet of zelfs eenvoudig schuim, de golven gladder maken. Het lijkt zeer waarschijnlijk dat in die verschillende gevallen kleine hoeveelheden olieachtige of harsachtige stoffen op het water gebracht worden; de aanwezigheid van schuim wijst al op het voorkomen van oppervlaktelaagjes. Maar wat te zeggen van de verhalen van zeelui over de bedarende werking van hagel, ijsnaalden, regen of natte mist (volgens Larisch)? In het geval van de regen acht Reynolds een verklaring mogelijk: elke druppel veroorzaakt een wervelring en mengt waterlagen van verschillende snelheid door elkaar[1)]. Iets dergelijks kan men zich ook voor de hagelkorrels voorstellen. Maar voor ijsnaalden en mistdruppeltjes is die verklaring nauwelijks houdbaar. Sommigen beweren dat het voldoende is als de taaiheid der oppervlaktelaag gewijzigd wordt; anderen denken aan temperatuurverschillen, waardoor oppervlakjes van verschillende capillariteitsconstante naast elkaar voorkomen.

Goede waarnemingen hierover zijn nog zeer nodig.

104. Gerimpelde en effen gebieden op onze binnenwateren[2)] - (Vgl. deel I, Plaat XV).

Een vijver, een kanaal, vertonen haast altijd gedeelten die met rimpels overdekt zijn, naast andere die er geheel glad uitzien. Klaarblijkelijk is het de wind die de rimpelingen teweegbrengt, maar waarom hier wel en daar niet? We bemerken weldra dat men de rimpels alleen goed ziet aan de grens van de lichte en donkere partijen die het water weerspiegelt, omdat dan het gerimpeld oppervlak voorwerpen van andere helderheid terugkaatst dan het gerimpelde; om de verdeling der rimpels te beoordelen moeten we dus achtereenvolgens van verschillende standpunten kijken.

Het blijkt ons nu, dat het water nabij de oever van waar de wind waait bijna altijd gerimpeld is, de kant naar waar hij waait is effen. Merkwaardig is de scherpe grenslijn tussen beide gebieden, die vooral bij een regenbui verrassend duidelijk zichtbaar is. Het effen gedeelte is de strook naar dewelke de wind alle verontreinigingen

1) Nat. **11**, 279, 1875.
2) Halbfass, Beiträge z. Geophys. **13**, 306, 1914. - Halbfass, Grundzüge einer vergleichenden Seeenkunde (Berlin 1923), blz. 147. - De bezwaren van dezen schrijver tegen de theorie der oliehuidjes zijn thans niet meer vol te houden.

van het wateroppervlak heeft geblazen; dorre bladeren, grasjes, afval drijven daar, *maar worden niet gewoon naar de kant bij elkaar gedreven*: men kan duidelijk zien dat ze niet vrij bewegelijk zijn, maar verbonden door een onzichtbaar vlies dat hun bewegingen belemmert. Zo komen wij er vanzelf toe, te onderstellen dat de effen gedeelten door een uiterst dun vetlaagje bedekt zijn, waar de capillaire rimpels door gedempt worden. Aan de rimpels kan men zien hoe de uitbreiding van het vetlaagje verandert; een voorbijvarende boot, een schaar watervogels verstoren de regelmaat der grenslijn. Op grote plassen kan men soms duidelijk opmerken dat het oliehuidje zich juist bij de uitmonding van een riool vormt, in het kielzog van een schip, om het lijk van een vis. Weldra leert men uit de rimpelingen beoordelen of het water van een rivier min of meer verontreinigd is; het bewegelijke oppervlak der beek met al zijn tintelingen maakt een geheel andere indruk dan de stroperige, effen kanalen in de nabijheid van fabrieken en achterbuurten.

Het is niet alleen de wind die het oliehuidje met zich meevoert. Overal waar de stroming nabij het oppervlak vertraagd wordt, bijvoorbeeld door een stuw, door een in het water dompelende balk, wordt het capillaire huidje tegengehouden; dikwijls is zijn grens net zichtbaar, alsof er een fijne draad op het water dreef. Als het beekje zeer ondiep is en de bodem uit blank zand bestaat, kan men in de zonneschijn de schaduw van deze grenslijn bespeuren.[1)]

De olielaagjes waarover het gaat zijn stellig dunner dan 0,2*μ* (= 0,0002 mm), anders moesten ze interferentiekleuren vertonen. Feitelijk komen allerlei dikten voor, van 0,001 *μ* tot 0,1 *μ*. Het schijnt dat olie zich alleen tot zulke uiterst dunne huidjes uitbreidt, wanneer ze niet volmaakt zuiver is, doch kleine hoeveelheden hars of vrij vetzuur bevat (vgl. **I**, § 160).

Op de effen gebieden kan men stelselmatig waarnemingen doen betreffende de invloed der verontreinigingen[2)]:

bij lichte wind rimpelt een verontreinigd wateroppervlak niet; bij sterkere wind vertoont het alleen golfjes die vloeiend afgerond zijn in plaats van een scherpe top te hebben;

bij regen vormt elke druppel er kleiner en minder talrijke kringen dan in het schone water; dit laatste siddert van duizend trillingen die in alle richtingen dooreenlopen, terwijl het geoliede oppervlak eenvoudig om elk druppeltje een beperkt

1) Nat. **137**, 777 en 1073, 1936; **138**, 466, 1936.
2) Ritter, Ann. Soc. météor. France, **43**, 1895. - Naturwiss. **5**, 137, 1917.

ringenstelseltje vertoont; deze waarneming bewijst afdoende dat het ontbreken van fijne rimpeltjes in de oliegebieden niet te wijten is aan een 'minder vat hebben' van de wind, maar dat het door de sterkere demping te verklaren is;

bij buien geeft elke grote druppel in het geoliede gebied een bel, die verscheidene sekunden bestaat, terwijl in het schone gebied de druppel onmiddellijk in kleine druppeltjes uiteenspat; hetzelfde merkt men bij het roeien, als de riemen water doen opspatten;

een heel klein stukje kamfer (een paar mm groot), dat men op een verontreinigd oppervlak laat vallen, beweegt weinig, terwijl het op een schoon oppervlak de grilligste bewegingen uitvoert;

een druppel benzine spreidt zich slechter uit op een vuil dan op een schoon oppervlak;

talkpoeder of lycopodiumpoeder kunnen over een schoon oppervlak voortgeblazen worden (ze worden er niet door bevochtigd); in een verontreinigd oppervlak blijven ze plakken en zweven er niet over heen;

een goed gereinigd glazen staafje, niet met de vingers aangeraakt, wordt in het water gedompeld en er dan voorzichtig uit omhoog getrokken; als de stofjes op het omgevende wateroppervlak naar de staaf toe drijven, is er een oliehuidje; bij een schoon oppervlak bemerkt men een zwakke beweging van het staafje af;

als men een hete metalen knop boven het oppervlak houdt, vormt zich daaronder een stofvrije plek.

Verschillende dezer kenmerken vormen in de praktijk niet zulk een scherp kriterium: er zijn allerlei overgangen. De twee laatste waarnemingen gelukken alleen op een *zeer* zuiver oppervlak.

Naast de aanwezigheid van oliehuidjes zijn er nog sommige andere oorzaken van rimpeling van het wateroppervlak bekend, die in uitzonderlijke gevallen een rol kunnen spelen.

a. Soms delen de stoom- of motorboten aan het oppervlak een reeks kleine trillingen mee die het oppervlak rimpelen; dat is de nog onvoldoend bekende 'trepidatie'. Ik heb soms het water om een stilliggende boot, waarvan de motor evenwel werkte, aan alle kanten met een patroon van kleine ribbels bedekt gezien, die tussen de boot en de kade prachtige interferenties en staande golven vertoonden.

b. Soms ziet men hoe de zee gerimpeld is op de plaats van de schaduw ener alleendrijvende wolk; rechtstreekse meting

toont aan dat het oppervlak daar snel afkoelt, en dit zou de dichtheid of de oppervlaktespanning voldoende veranderen opdat rimpelingen aan de grens van dit gewijzigde gebied tegengehouden zouden worden.[1)]

c. Gladde gebieden zouden kunnen ontstaan daar waar er een opstijgende stroming is.[2)] Het water dat van beneden komt neemt nog geen deel aan de golfbeweging, en eer deze zich eraan meedeelt is het al door nieuw aankomend water vervangen. Uit de theoriën van Bjerknes over de diskontinuïteitsoppervlakken zou dan begrijpelijk zijn waarom die gebieden meestal een lange, smalle vorm hebben.

105. Druppels.

Bekijk aandachtig de dauwdruppeltjes op een grashalm. Ze bevochtigen hem niet, omdat hij met een dun waslaagje bedekt is. De druppeltjes zijn des te mooier bolrond naarmate ze kleiner zijn, omdat de werking van de zwaartekracht dan geen rol meer speelt vergeleken met de oppervlakte-spanning. Ook op klaver, een Robiniablaadje en andere planten zijn de dauwdruppeltjes prachtig. Veel waterplanten worden niet bevochtigd door water dat er toevallig op spat; zo ziet men al van verre de zilveren pareltjes schitteren op het Rood Kroos (= Azolla), dat men in Holland en Utrecht op veel sloten aantreft.

Een struikje in de regen kan verrukkelijk mooi zijn, bijvoorbeeld meidoorn in de winter. Aan elke scherpe hoek hangt een parel van water, fonkelend in het licht. Bekijk ook de regendruppels aan de naalden van een denneboom.

Een spinnewebdraad die zich met dauw bedekt in de herfstmorgen, is niet bekleed met een gelijkmatig dun waterhuidje, maar met een parelsnoer van druppeltjes. Dat komt, omdat een dunne watercylinder labiel wordt onder de werking der oppervlaktespanning als zijn lengte groter is dan zijn omtrek. - Nog mooier kan men dit zien bij een gewoon, niet-bedauwd spinneweb van het rondgewerkte soort, liefst van een volwassen spin[3)]; knip een gaatje in een stuk karton en smeer daaromheen een weinig gom: u kunt nu gemakkelijk een of twee van de buitenste concentrische draden van het web vastgeplakt krijgen, zo dat ze over het gaatje lopen en met een flinke loupe bekeken kunnen

1) J. Thomson, Phil. Mag. **24**, 247, 1862. - Halbfass, Naturwiss. **5**, 496, 1917.
2) Ann. Hydr. **44**, 227, 345, 1916.
3) C.V. Boys, Soap Bubbles (London 1907), blz. 84.

worden (fig. 94). Men ziet nu de draad bedekt met talloze druppeltjes van misschien 0,03 mm dik en op 0,06 mm afstand van elkaar. Er zijn er meer dan 250·000 over het gehele net! Zij ontstaan doordat de spin een draad maakt van snelstollende zijde, en daar omheen een lijmachtige vloeistof afscheidt, die eerst een cylinder vormt, en dan in een reeks bolletjes overgaat. Uit de hoger genoemde stabiliteitsvoorwaarde vindt men gemakkelijk dat de bolletjes op een afstand van

$$\left(\frac{16\pi^2}{3}\right)^{1/3}$$

maal hun eigen straal van elkaar verwijderd moeten zijn, dus, gemeten van centrum tot centrum, op ongeveer 2 maal hun middellijn. Dat komt niet



Fig. 94. Druppeltjes langs de draad van een spinneweb.

slecht uit. Als u goed kijkt kunt u zelfs zien dat er midden tussen twee grote druppeltjes meestal nog een heel kleintje zit, precies zoals de theorie der minimum-oppervlakken het vereist! Men kan het verschijnsel volkomen nabootsen, door een zeer dunne kwartsdraad even in castorolie te dompelen; het is dus wel zeker dat het niet de spin is die de theorie der minimum-oppervlakken heeft bestudeerd!

Het is zelfs voldoende, een weinig speeksel tussen duim en wijsvinger tot een draadje uit te trekken: onder het vergrootglas ziet men dan duidelijk dat er een centrale, dunne draad is, bezet met afwisselend grote en kleine druppeltjes.

106. Rollende waterdruppels.[1)]

Bij een heftige regenbui ziet men soms, op een vijver, waterdruppeltjes die enkele sekunden over het oppervlak van het water rollen, zweven om zo te zeggen, en die dan pas verdwijnen. Neen, het zijn geen luchtbellen! ze zijn kleiner en schitteren op een bijzondere manier. Men ziet ze ook bij de voorsteven van een snelvarende motorboot, als hij het water doet opspatten in zijn vaart.

Osborn Reynolds zegt, dat men die rollende droppels *niet* krijgt als men eenvoudig eens met een stok in het water plonst; hij geeft de raad een plaats uit te zoeken waar het oppervlak schoon lijkt, en daar herhaaldelijk en telkens opnieuw in het water te roeren en te plassen. Ir. P. Schut merkte onafhankelijk het verschijnsel op bij het baden in zee: men moet *hard* op het

1) O. Reynolds, Proc. Manch. Lit. Philos. Soc. **21**, 39, 1881. - Papers, **1**, 413.

water slaan, alsof men iemand nat wil spatten. Reynolds verklaart de proef door te zeggen dat het oppervlak volmaakt vrij van vethuidjes moet zijn; het plonsen dient eenvoudig om het oppervlak te scheuren en vers water uit de diepte aan te voeren; en hij denkt dit aan te tonen, door het oppervlak eerst met zwavelbloem te bestuiven, die zich aan het onzichtbare huidje vasthecht: de rollende druppels verschijnen juist daar waar het bestoven oppervlak door helder water verdrongen is, en ze verdwijnen waar het 'oude' oppervlak weer begint. - In het licht van moderne onderzoekingen schijnt een andere verklaring echter waarschijnlijker. We weten nu dat een oliehuidje eer gunstig dan ongunstig is voor de vorming van rollende druppels; maar wat hindert zijn de stofjes, de stofjes op het water en zelfs de stofjes in de lucht. Door het plassen krijgt men een schoon, stofvrij oppervlak en verwijdert men zelfs de stofjes uit de onderste luchtlaag; op het gezwavelde oppervlak ontbreken de rollende druppels, omdat daar behalve de oorspronkelijke stofjes ook het fijne zwavelpoeder hun vorming belemmert.

107. Schuim.

Waar zich schuim op het water vormt dat niet onmiddellijk verdwijnt, kunnen we wel zeker zijn dat er bepaalde organische verontreinigingen in het water voorkomen, die het oppervlak als een huidje bedekken. Het zijn vooral de *saponinen* die dit doen (zo genoemd naar zeep = sapo, die in hoge mate dezelfde eigenschap bezit); ze worden gevormd door een aantal waterplanten en zeewieren. Hun molekulen zijn zeer langwerpig, en hebben aan het éne eind een grote affiniteit voor water, zodat ze zich loodrecht op het wateroppervlak stellen als korenaren op een akker.

Waar er zand gestort wordt in een sloot, ziet men grote hoeveelheden van een bruinachtig. schuim bovendrijven. Waaruit bestaat dat?

Als er na een storm grote hoeveelheden schuim op de zee voorkomen, kunt u er gemakkelijk een emmertje mee vullen en kijken hoe het er na een uur uitziet: een gedeelte van het schuim is overgegaan in een vuile, bruine vloeistof, waarin men soms met een mikroskoopje infusoriën ziet rondzwemmen.

'Gewoonlijk blijft zeeschuim slechts even nadat het gevormd is bestaan, het gaat over in een witte laag en verdwijnt. Maar het schuim van een aanhoudende storm is geheel verschillend; het is "geslagen schuim", dik, blijvend, en heel vies over een

vuilgekleurde zee, vooral door zijn eigenschap om over de toppen der golven te blijven hangen en zich in klodders te verenigen, die door de wind voortgedreven worden.'

'Na een felle storm van enkele dagen is het water niet alleen tot gewoon schuim geslagen, maar tot een massa zich ophopende "gist", die in touwen en festoenen hangt van golf tot golf, en bij hun overstorten en breken als een draperie afhangt; het wordt door de wind meegenomen, niet in vervliegend stof, maar als geheel, in gewrongen, afhangende, gewonden massa's, die de lucht als met witte en dichte sneeuw vervullen, en waarvan de vlokken elk een voet of twee lang zijn.'[1)]

108. Donkere vlekken op asfaltwegen.[2)]

Op onze asfaltwegen ziet men dikwijls langwerpige vlekken; vers zijn ze donker, na een dag of twee worden ze bleker en verdwijnen tenslotte[3)]. Soms zijn er uitgerekte ringen bij, andere malen ringen met knobbels (fig. 95). Altijd zijn de vlekken verlengd

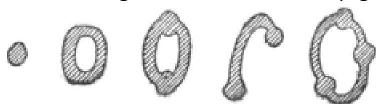


Fig. 95. Donkere olievlekken op asfaltwegen.

in de richting van de weg en van het verkeer. Sommige zijn maar een paar centimeter lang, men heeft er echter ook van 35 cm gezien. De vormen wisselen van plaats tot plaats en van dag tot dag.

Het lijkt waarschijnlijk dat we hier te maken hebben met oliedruppels die van automobielen weggespat zijn; zijn het dezelfde druppels die op natte wegen de prachtige gekleurde ringen vormen? Ontstaan dan de ring- en knobbelvormen bij het opdrogen, ofwel bij het uitwalsen van een druppel door een automobielwiel?

109. Slechte bevochtiging; flotatie.

Bij regenbuien vormen zich evengoed plassen op het droge zand der duinen als op gewone grond. Alleen het zand dat vlak bij het oppervlak ligt wordt bevochtigd en vult zich met water; reeds op 3 tot 8 cm diepte vindt men het gewone, kurkdroge en luchthoudende zand. Na enige tijd echter ontstaat de bevochtiging, en de hele plas loopt in enkele sekunden leeg.

1) Ruskin, Modern Painters, III, 569.
2) Quant, de Natuur, **51**, 115, 1931.
3) Quant geeft op: vers, glinsterend blauw; later donkerder.

Men kan de ‘afvoerbuizen’ uitgraven en volgen, te midden van de droog gebleven laag.[1)]
Goed door de zon gedroogd zand kan aan de oppervlakte van een rivier blijven drijven en meegenomen worden door de stroom, terwijl toch iedere korrel soortelijk veel zwaarder dan water is; de korrels kunnen vrij grof zijn, zelfs kleine steentjes van 2 mm middellijn komen voor! Roert men, dan zinkt het zand onmiddellijk. Het verschijnsel is zeldzaam, het wordt ook waargenomen aan meren met zandige oevers, wanneer een zachte wind van de oever naar het meer waait; het stuivende zand vormt vlekken van enkele centimeters middellijn, die echter al op enkele meters van de oever zinken, omdat de korrels nat geworden zijn. - Men kan het verschijnsel nabootsen in 't laboratorium en maakt er gebruik van in de techniek (‘flotatie’)[2)].

110. De watergolven als model van de algemene golftheorie. - (Plaat VI).

De vergelijking van watergolven met geluid en licht is inzoverre niet geheel goed, dat de interferentie van watergolven niet uit het eenvoudig optellen van de amplituden te berekenen is. Tussen twee interfererende watergolven is er altijd *wisselwerking*.
Bij de proeven hinderen de golven die door de oever teruggekaatst worden. Dit bezwaar is echter niet groot, wanneer de oever zacht glooiend oploopt: de golven worden daar dan gedempt.

1. *Uitzending van golven door een resonator*. - Dompel een bal periodiek in het water: er ontstaat een stelsel concentrische golven.
2. *Interferentie*. - Werp gelijktijdig twee stenen in 't water. Twee stelsels cirkelgolven breiden zich uit. Ieder van beide gaat zijn gang dwars door het andere, alsof dat stelsel er niet was; waar de golfjes elkaar doorkruisen ziet men ze interfereren: twee golfbergen of -dalen versterken elkaar, een golfberg en een golfdal verzwakken elkaar.
3. *Spiegelproef van Fresnel*. - Bevestig twee balkjes aan een dwarsplankje van 50 cm lengte, gebruik dat als handvat om de twee balkjes gelijktijdig rhytmisch in het water te dompelen en eruit te trekken. Er ontstaan twee golvenstelsels die samen

1) J.W. van Dieren, Organogene Dünenbildung, blz. 92 (Diss. Amsterdam, 1934).
2) Nat. **4**, 19, 1871. - Amer. Journ. of Sc. **40**, 476, 1890. - Science, **63** en **64**, 1926.

interfereren zoals bij de spiegelproef van Fresnel met monochromatisch licht. Variëer de trillingstijd en de amplitude tot het patroon zo mooi mogelijk is. Met enige aandacht kan men zien hoe de knopen en buiken op hyperbolen liggen, waarvan de twee trillende balkjes de brandpunten zijn. - Terugkaatsing door de oever is bij deze proef zeer hinderlijk.

4. *Spiegelproef van Lloyd*. - Kies ditmaal met opzet een steil afvallende oever, b.v. de vertikale muur van een kade. Laat een balkje op en neer trillen in het water, op 1 m afstand van de oever. De golven die ontstaan interfereren met de teruggekaatste, en hyperbolen worden zichtbaar zoals bij de vorige proef.
5. *Beginsel van Huygens*. - Een plankje, dat met enkele grote spijkers bezet is op de wijze van een hark, wordt in het water gedompeld. Elke spijker geeft een golfkringetje, al deze kringen samen vormen een rechte golf die aan de uiteinden halfcirkelvormig om het plankje loopt.
   Een stok die in het water geworpen wordt vormt een dergelijk golvenstelsel, dat men zich ontstaan kan denken uit de samenwerking der elementaire golfjes van al zijn punten.
6. Een gebogen staaf of tak geeft kringgolven, waarvan het middelpunt overeenkomt met het krommingsmiddelpunt der staaf. Aan de holle zijde worden de golfkammen steeds korter, en dus hoger; aan de bolle zijde steeds langer, dus lager (want de energie verdeelt zich over een groter watermassa).
7. *Evenwijdige golffronten*. - Prachtige evenwijdige golffronten ontstaan als een touw min of meer waterpas in of uit het water gaat. Of als een lange plank in het water staat, met haar korte zijde vertikaal, en men haar een weinig heen en weer schommelt.
8. *Buiging aan een schermrand*. - Laat evenwijdige golven tegen een plank aankomen, die evenwijdig aan de golfkammen staat. Achter de plank ontstaat een 'schaduw'; maar: *a*) de golven buigen enigszins om de rand en komen binnen de geometrische schaduw, zij het ook verzwakt; *b*) buiten de geometrische schaduw voegt zich de invallende golf bij een zwakkere golf welke door de schermrand verstrooid wordt, zodat daar interferenties ontstaan.
   Aan golfjes zoals de wind ze verwekt kan men dikwijls verschijnselen waarnemen die oppervlakkig op buiging gelijken, maar die eigenlijk geheel anders op te vatten zijn. Wanneer we bijvoorbeeld zien hoe golven zich om een eilandje uitbreiden, ook aan de lijzijde, die in de windschaduw ligt, moeten we bedenken dat de door de wind gevormde golfjes geen lange even-

wijdige kammen hebben, maar dat ze te denken zijn als de superpositie van een aantal golfbewegingen, die allerlei kleine hoeken met de windrichting vormen. Het eilandje onderschept sommige van die golvenstelsels, maar hun divergentie is zo groot, dat er, ook afgezien van de echte buiging, altijd nog golven langs een groot deel van de kustlijn kunnen lopen.

9. *Buiging door een spleet*. - Een plank met een poortvormige opening wordt in het water gedompeld, en men laat er evenwijdige golven op invallen. Aan de achterzijde ziet men hoe ze uit de opening te voorschijn komen en zich als cirkelvormige golven uitbreiden, wanneer de opening veel kleiner is dan hun golflengte. Als de opening ongeveer even groot is als de golflengte, beginnen de golven sterker te worden in de rechtdoorgaande richting. Bij een opening van 3 maal de golflengte is er al een duidelijke stralenbundel te zien die door de spleet gaat, maar de randen der golfjes zijn nog onscherp en gekromd. Bij een spleet van 10 maal de golflengte is de stralenbundel al vrij goed begrensd.
   Bij deze proeven kan men evengoed een puntvormige trillingsbron nemen, die concentrische golven uitzendt ('buigingsverschijnselen volgens Fresnel'). Het is ook leuk, bij éénzelfde opening de golven eerst langzaam, dan sneller op elkaar te laten volgen, en na te gaan hoe het buigingsbeeld verandert naarmate de golflengte kleiner wordt.
   Dergelijke buigingsverschijnselen aan watergolven kan men dikwijls zonder enige voorbereiding waarnemen, bijvoorbeeld waar een smalle sloot in een breed kanaal uitmondt, en de wind in de richting van de sloot blaast en golfjes maakt. Of aan halfgeopende sluisdeuren. Of in een haven, waar de grote zeegolven binnendringen door de opening tussen de golfbrekers, en de hele haven vullen met beweging, terwijl de kleine kabbelingen dat niet doen.

10. *Buiging door een klein scherm*.[1] - Bij wijze van tegenhanger onderzoeken we de buiging van evenwijdige golven door een plank. Als de plank meer dan 10 maal de golflengte lang is, werpt ze een duidelijke schaduw. Bij een plank van 3 maal de golflengte beginnen de golven al sterk in de geometrische schaduw door te dringen. Bij een plankje dat niet breder is dan de golflengte is de schaduw bijna weg. Een hindernis die veel kleiner is dan de golflengte geeft secundaire kringvormige golven: verstrooiing.

1) Zs. math. naturwiss. Unterricht, **60**, 398, 1929.

11. *Verstrooiing*. - Het is winderig weer en op de singel hebben zich kleine golfjes gevormd. In evenwijdige rijen komen ze aan. Daar dobbert een stukje hout, en nu ziet men erg mooi hoe zich daaromheen kringgolfjes uitbreiden. De verstrooiing is gering, omdat het stukje hout drijft, en dus even zwaar is als het verplaatste water; er is slechts verstrooiing, omdat het zwaartepunt van het hout en van het verplaatste water niet overeenstemmen, en de kracht der aankomende golven dus anders op het hout werkt[1]. Kijk hoe het gaat! Bij elke golving wordt het hout iets vroeger opgeheven dan het water, of valt het iets sneller terug; het is dus alsof de golf het hout geheel meenam, maar er daarenboven een 'schijnkracht' was, die het periodiek op en neer beweegt, ten opzichte van het water, in

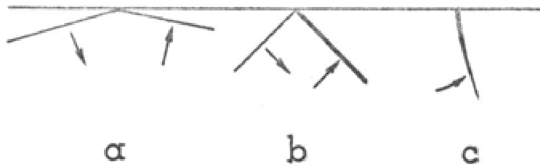


Fig. 96. Terugkaatsing van watergolven bij verschillende invalshoeken.

hetzelfde tempo als de golven, maar in een andere phase. De uitgezonden kringgolven interfereeren met de rechtstreeks doorgaande golffronten en verzwakken ze; de energie die ze aan deze golven onttrokken hebben wordt naar alle zijden uitgezonden.
Dit is nu precies wat met het licht gebeurt als het door een heel fijn stofdeeltje wordt verstrooid. Onze evenwijdig invallende watergolven zijn 'gepolariseerd', hun trillingen geschieden alleen op en neer; vandaar dat het buigende deeltje ook slechts in dezelfde richting gepolariseerde trillingen uitzendt (vgl. **I**, § 185).
12. *Terugkaatsing*. - Laat evenwijdige golven schuin invallen op de oeverrand of op een vaste plank. Ze worden teruggekaatst, men ziet hoe de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing (fig. 96). Volg aandachtig hoe de terugkaatsing gebeurt: de punten van het golffront die het eerst de oever bereiken geven het eerst een nieuwe teruggekaatste elementairgolf; al de elementairgolfjes samen vormen het nieuwe golffront.

1) De verstrooiing zou sterker zijn als het houtje met een veer aan de bodem verbonden was. Vgl. Physica, **9**, 96, 1929.

Het proces is goed te volgen als men de golven laat terugkaatsen tegen de rij spijkers van proef 5.
Voor kleine invalshoeken, dus als het golffront een geringe hoek met de 'spiegel' maakt, is het treffend hoe de hoogte der golven nauwelijks door de terugkaatsing verandert. Bij 45° wordt de teruggekaatste golf echter zwakker; bij 60° is dit nog opvallender. Daarboven is er geen eigenlijke terugkaatsing meer, men ziet alleen het uiteinde der golf krommen tot ze loodrecht op de wand staat en zeer hoog worden (doordat de teruggekaatste golf zich op de invallende superponeert).[1)] Hier blijkt wel dat de terugkaatsing van een watergolf verschilt van die ener lichtgolf, en dat het niet een zo banaal verschijnsel is als u wellicht hadt gedacht!

13. *Virtueel beeld in een spiegel*. - Werp een grote steen in het water bij een steile oever, en volg de zich uitbreidende kringen. Zodra ze de oever bereiken worden ze teruggekaatst (let precies op hoe dit gebeurt!); het denkbeeldige middenpunt der teruggekaatste golven ligt even ver *achter* de wand als het middenpunt van de oorspronkelijke golven *ervóór*.
Een schip vaart door een kanaal, gevolgd door zijn sierlijk patroon van watergolven. Aan beide kanten worden ze door de oever teruggekaatst; het is alsof er beiderzijds een 'spiegelschip' voer, op een kanaalbreedte rechts en links van het echte schip. Heeft men zich eenmaal in die opvatting ingedacht, dan ziet men de twee spiegelbeelden elk met hun golfpatroon bijna lichamelijk voor zich.
14. *Holle spiegel*. - Laat evenwijdige golven invallen op een plank die in de vorm van een cirkelboog gekromd is. De teruggekaatste golven zijn cirkels die zich samentrekken naar een 'brandpunt'.
15. *Brandpunt*. - Kringgolven die men in het brandpunt van een holle wand opwekt, geven bij terugkaatsing een evenwijdig golffront.
16. *Bolle spiegel*. - Evenwijdige golven of kringgolven worden teruggekaatst tegen de bolle zijde van een plank of tegen de romp van een klein schip. De teruggekaatste kringgolven breiden zich uit als kwamen ze van een punt achter de bolle wand.
17. *Lens*. - De breking van watergolven kan men onderzoeken door de golven in ondiep water te laten komen, waar ze langzamer lopen. Een plank die enkele millimeters onder het wateroppervlak bevestigd is, kan aldus de rol van een 'lens'

1) Scott Russell, t.a.p.

vervullen en bijvoorbeeld cirkelgolven evenwijdig maken. Verander de afstand van de trillingsbron tot de lens.

18. *Beginsel van Doppler*[1] - In een snelvlietend maar effen riviertje kan men mooi het verschijnsel van Doppler laten zien, door aan de kant voorzichtig golfjes teweeg te brengen. In een bepaald geval richtte de natuur zelf zulk een proef in, doordat er uit een pijpleiding voortdurend druppels vielen die mooie kringen maakten. Men ziet de kringen stelselmatig vervormd (fig. 97), in de ééne richting liggen de kammetjes veel dichter bij elkaar dan in de andere. Soms is het beeld ietwat gewijzigd, namelijk wanneer de stroming vlak bij de oever gering

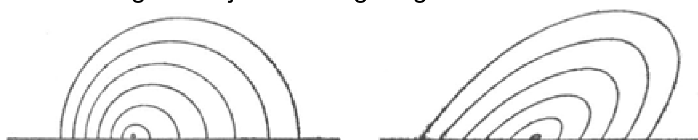


Fig. 97. Verschijnsel van Doppler aan watergolven. - Links: de snelheid van de stroming is dezelfde voor het gehele wateroppervlak; rechts: de stroomsnelheid neemt toe naarmate men zich verder van de oever verwijdert.

is en meer naar het midden der rivier toeneemt; dit is dan tevens een model van de wijze waarop de geluidstralen in de dampkring gekromd worden door de wind (II, § 14 en 16).

Waar een riviertje versnellingen en wervelingen vertoont, bijvoorbeeld onder een brug, worden de kringen sterk vervormd op onregelmatige wijze.

19. *Stralingsdruk.*[2] - Gooi een plankje in het water, en beproef het naar de oever terug te bewegen door stenen vlak erachter in het water te gooien. Dat lukt! Wel is een golfbeweging iets geheel anders dan vervoer van materie; voortbewegende golfjes veroorzaken nog geen stroming (§ 96). Maar zij oefenen stralingsdruk uit, omdat het plankje hen ten dele terugkaatst en ten dele absorbeert. Met een stukje van een net zou de proef *niet* slagen.

1) O. Reynolds, Proc. R. Soc. **22**, 531, 1874.
2) Physica, **3**, 129, 1923.

De vaste aarde.

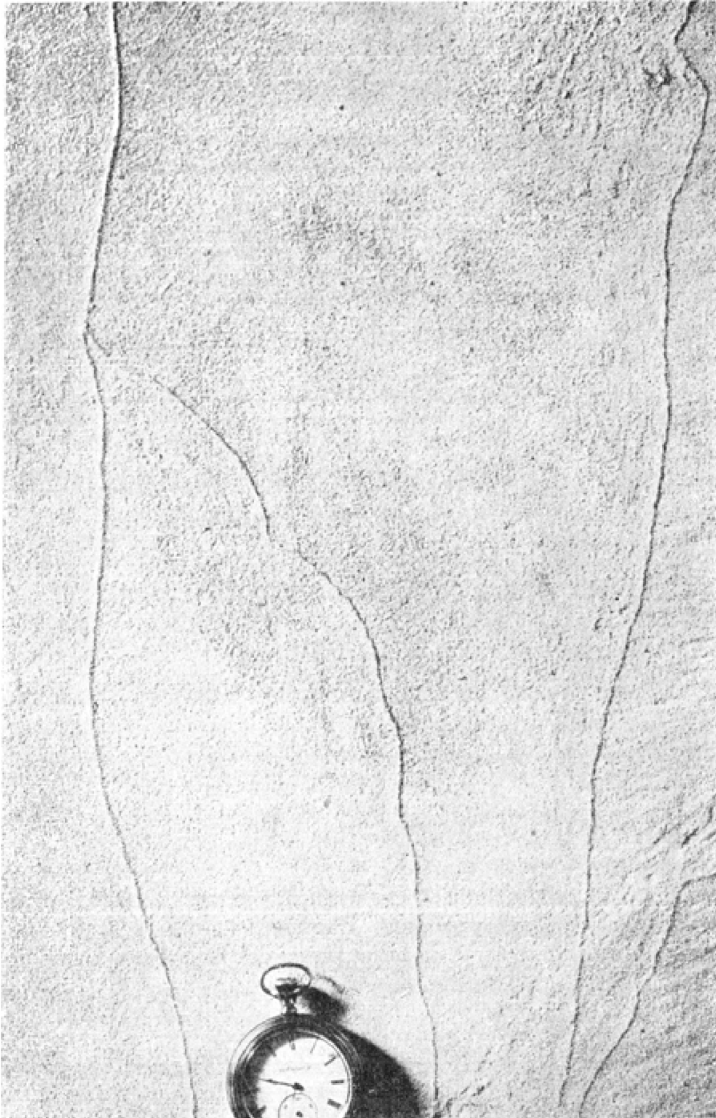
Vóór ik verder vertel moet ik aan de mooie brief denken die ik vandaag gekregen heb, en waarin over mijn klein kindje staat: '*Je zoon weet in het schamelste grasveltje buitengewone rijkdommen, onuitputtelijke schatten te ontdekken, en als ik hem in het gras neerzet kan ik niet vooruit raden wat hij er allemaal uit te voorschijn zal halen. Prachtig weet hij de terreinverschillen te waarderen; als hij zand vindt, gaat hij er zich in rollen, in begraven, hij neemt er handsvollen van die hij met innig genot over zijn haar uitgiet. Gisteren heeft hij een molsgat ontdekt, en je kan je niet voorstellen hoeveel genoegen hij daaraan beleefde. Hij kent ook de vreugden van een helling die men op zijn voeten kan afdalen, ieder ogenblik vallend, of al rollende, hetgeen ook voor het buitelen bevorderlijk is. De stijgende wegen interesseren hem, en ik wou dat je hem zijn wagen er tegenop zag duwen. Hij weet hoe lekker het is, aan een sloot te zitten, met de voeten in de diepte en het lichaam goed tegen de glooiing aangedrukt. Een dezer dagen heeft hij eindeloos gespeeld op een grote steen; hij streelde hem, hij vond er werkelijk een nieuw genoegen in. En het is mijn rijkdom, hem dit alles te zien ontdekken*.'
Zo is het dat een kind van vijftien maanden ons aanschouwingsonderwijs geeft.

Duhamel, La Possession du Monde, blz. 112.

111. Het aanspoelen van het zand. - (Plaat VII).

Het zand spoelt aan, doordat de snelheid van de aankomende golf groter is dan die van de terugstromende. De grove korrels worden dus wel naar het strand meegevoerd, maar worden niet meer zwevend gehouden in de zeewaarts terugkerende stroom, zodat ze bezinken. Aan de uiterste grens tot waar de golf komt gaat het ietwat anders. De vooruitschuivende waterlaag wordt dunner, dunner tot ze ineens door het zand opgezogen wordt: het glanzende zandoppervlak wordt op datzelfde ogenblik dof en wit. Buk u: u ziet dan hoe de weerspiegelde hemelhelderheid ineens vervangen wordt door een donkere matte kleur. Op deze strook spoelt zelfs het fijnste zand aan, want er is geen teruggaande stroom die de korrels weer mee kan voeren.
+

+ Zie over deze onderwerpen o.a. Vaughan Cornish, Waves of Sand and Snow (London 1913). - D.W. Johnson, Shore Processes and Shore Line Development (New York 1919).



PLAAT VII.
Strandlijsten, door vier achtereenvolgende golven op het strand achtergelaten en in gips afgegoten (§ 111).
Naar D.W. Johnson, Shore Processes, blz. 513.



PLAAT VIII.
Ribbels van zand en water. De golven hebben van rechts naar links over het strand gestroomd (§ 121).
Naar D.W. Johnson, Shore Processes, blz. 503.

Inderdaad: waar de rand van de golf verdwenen is, is er een sierlijk zoompje zand van een paar millimeter breedte te bespeuren: een *strandlijst* (plaat VII). De breedte van de strandstrook waar dit proces geschiedt hangt af van de helling van het terrein, de sterkte van de golf, enz.

Bij opkomend getij ontstaan een aantal *kleine gaatjes* in het zand, nabij de verste grens tot waar de golven op dit ogenblik komen, overal waar de lucht ontsnapt welke zich in het zand bevond; ze zijn trechtervormig, niet veel dieper dan breed, en vormen zich bij elke golf op andere plaatsen. - Op sommige delen van het strand zijn deze gaatjes weinig talrijk maar heel groot; de lucht borrelt er uit in bellen, als uit moddervulkaantjes. Blijkbaar zijn de zandkorrels over zulke gebieden vaster aaneengesloten, zodat er maar op enkele plaatsen een ‘zwak punt’ voorkomt waar de lucht ontwijken kan.

De strook van waar de zee zich heeft teruggetrokken is eerst donker, en wordt lichter en witter naarmate ze in de zon droogt, het eerst aan de zijde die het verst van de zee verwijderd is.

112. De samenstelling van het zeezand.[1)]

Zeezand maakt geen vlekken op onze kleren, het valt vanzel[f] af, zodra het droog geworden is. Deze eigenschap is te wijten aan het ontbreken van alle klei-bestanddelen.

Bekijk zeezand onder 't vergrootglas, liefst op een zwarte achtergrond. Het bestaat uit allersierlijkste keurige korreltjes die tenminste 0,1 mm groot zijn; eigenlijk ‘stof’ ontbreekt. De meeste korrels bestaan uit kleurloos, half doorzichtig kwarts. Of ze zijn wit, geelachtig en roodachtig: veldspaat. Donkerzwarte korrels zijn magnetisch ijzeroxyde of titaniumijzer.

Bij ribbelvorming (§ 121) komen de zwaardere stoffen, ijzererts, granaat, amphibool en pyroxeen, in de dalen; de lichtere stoffen, kwarts en veldspaat, op de toppen. De eerstgenoemde zijn donkerder van kleur, zodat de ribbels bijzonder duidelijk worden.

Het zand der Hollandse duinen is geelachtig, doordat elke korrel met ee laagje ijzeroxyde bedekt is; daardoor wordt dit zand kleverig en verwaait minder. De vorming van dit ijzeroxyde hangt samen met de grotere rijkdom aan mikroörganismen en bakteriën. Nabij Bergen en Schoorl wordt het zand helderwit, men spreekt van ‘zilverzand’. Ook op de West-Friese eilanden is het duinzand fijn en wit, er komen minder stukjes schelp in voor: ‘de witte duinen’ (Dubois).

1) F. Solger, Dünenbuch (Stuttgart, Encke, 1910).

Het zand is ontstaan doordat de golven in vóórhistorische

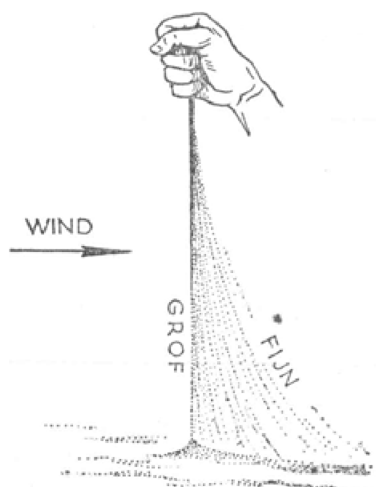


Fig. 98. Sorteren van het zand door de wind.

tijden de gesteenten hebben uiteengevreten waaruit onze kusten bestonden, tot ze in afzonderlijke korrels uiteenvielen. Kleideeltjes zijn daarbij wel gevormd, maar worden door de minste beweging der golven meegenomen en zwevende gehouden: ze worden niet aan de kust afgezet. Zandkorrels integendeel zijn juist zó groot, dat ze door een heftige waterbeweging meegevoerd worden, doch neerzinken zodra de golf tegen de kust slaat, haar energie verliest, en langzaam terugvloeit. Door de afwezigheid van zeer fijne bestanddelen in het zand is onze zeelucht zo heerlijk stofvrij.

Deze eigenschappen vindt men niet terug bij woestijnzand; daar is geen uitkiezen van de korrels gebeurd, er is dus veel stof aanwezig.

Neem een handvol zand, houd het 50 cm boven de grond, en laat het in een fijn straaltje weglopen: de wind sorteert de korrels en blaast de lichtste het meest opzij (fig. 98). Er vormt zich een bergje, waarvan de kleur en de overige eigenschappen geheel anders zijn aan het ene dan aan het andere uiteinde. Deze eenvoudige proef geeft onmiddellijk een indruk van de ongelijksoortigheid der korrels waaruit het zand bestaat. Zand van onze binnenduinen (Soest en elders) blijkt uit ongelijker korrels te bestaan dan duinzand.

113. Soortelijk gewicht van zand en andere grondsoorten.[1)]

De grond bestaat uit vaste korrels, grotere en kleinere, met daartussen water en luchtholten. De natuurkundige eigenschappen van det stelsel zijn bijzonder belangwekkend, vooral

1) Bij proeven met aarde gebruike men nooit drinkglazen van dik, geperst glas; deze zijn dikwijls slecht gekoeld en vertonen inwendige spanningen. Wordt hun oppervlak door een zandkorreltje geritst, dan *ontploffen* ze!

die van de fijnste korrels, die een kolloidaal bestanddeel vormen. Het water zit niet alleen in de capillairtjes tussen de korrels, maar vormt ook een laagje dat hun oppervlak overtrekt, zo sterk gebonden dat het bijna als vast, als een soort ijs te beschouwen is.

Het soortelijk gewicht van een grondsoort heeft natuurlijk een zeer betrekkelijke betekenis, het is een gemiddelde. Laten wij dit eens bepalen, niet in 't laboratorium, waar het grondmonster dikwijls half uitgedroogd aankomt, maar buiten, ter plaatse.

De getallen die we aangeven werden verkregen bij een bepaalde proef, uitgevoerd met akkergrond te St-. Michiels Gestel, bij regenweer. We hebben een cylindrische bus meegenomen, een inmaakblikje van ongeveer 150 cm^3 waarvan we deksel en bodem hebben weggeknipt. De preciese maten, 6,00 cm hoogte, 5,57 cm middellijn, geven ons de inhoud $\pi r^2 h$ = 146 cm^3. Met een brievenweger die we bij ons hebben vinden we dat het busje, tezamen met een kartonnetje dat we straks als deksel gaan gebruiken, 51 gram weegt. Dit busje drukken we nu met een zacht schroevende beweging in de grond, tot het geheel met aarde gevuld is. Met een mes snijden we de aarden cylinder bovenaan glad af, bedekken hem met ons kartonnen plaatje, halen voorzichtig het geheel uit de grond naar boven, en keren het onderste boven; is er wat aarde afgevallen, dan voegen wij dat erbij, zorgend dat de bus precies gevuld is, en vermijdend sterk op de aarde te drukken. Het geheel weegt 288 g, de aarde alleen dus 288-51 = 237 g. Het soortelijk gewicht bedraagt 237/146 = 1,62.

Nauwkeuriger inlichtingen omtrent de samenstelling onzer grondsoort krijgen we echter pas, als het ons gelukt aan te geven hoe het gehele volumen V samengesteld is uit het korrelvolume k, het watervolume w en het luchtvolume l. Ter contrôle willen we het grondmonster in twee delen splitsen, en de bepaling voor elk afzonderlijk uitvoeren. We beginnen met *het korrelvolume* te bepalen. - Vul een flesje van 200 cm^3 geheel met water, en weeg het op de brievenweger: 332 g. Giet het water weg, en breng een afgewogen deel van ons grondmonster in het flesje, bv. 89 g. Het gaat niet heel gemakkelijk, geduldig schuiven we telkens wat aarde door de vrij nauwe hals, af en toe met een potlood meehelpend; alle klompjes moeten tevens fijngewreven zijn, terwijl we toch niets van het materiaal mogen verliezen. Voeg er water bij tot het flesje grotendeels gevuld is; schud goed, laat het schuim ontwijken, voeg weer water bij, enz. tot het flesje geheel gevuld is en praktisch al het schuim ontweken is (dit is de lucht, die zich in de capillaire ruimten bevond!). Het geheel

weegt nu 381 g, dus 381 - 332 = 49 g meer dan eerst. Die gewichtsvermeerdering is ontstaan, doordat een bepaald watervolume door de korrels verdrongen is. Van zandkorrels is het s.g. 2,65, van water 1. Dus is

k (2,65 - 1) = 49 en k = 49/1,65 = 30 cm^3.

Nu kunnen we ook het volume der andere bestanddelen aangeven: Want als k het volume der korrels is, is hun gewicht 2,65k = 79 g; dit, afgetrokken van het totale gewicht, geeft het watergewicht, dat numeriek gelijk is aan het watervolume: 89 - 79 = 10 cm^3. Het grondmonster had een gemiddeld soortelijk gewicht 1,62; het onderzochte eerste deel had dus een volume van 89:1,62 = 55 cm^3. En *het luchtvolume* was: 55 - 30 - 10 = 15 cm^3.

In breukdelen van het geheel uitgedrukt vinden we voor de bestanddelen aan korrels, water, lucht: 0,55 - 0,18 - 0,27.

De gevolgde werkwijze komt dus neer op het oplossen van 3 vergelijkingen met 3 onbekenden. Met het tweede deel van ons grondmonster krijgen we evenzo:

1,65 k = 80

2,65 $k + w$ = 149

$V = k + w + l$ = 92.

Hieruit volgen: k/V = 0,53; w/V = 0,22; l/V = 0,35. - De overeenstemming met de eerste bepaling is bevredigend.

Bij andere grondsoorten kan het soortelijk gewicht der korrels groter zijn (klei) of kleiner (humus). Men neemt dan een tweede monster van dezelfde grond, weegt het, en droogt het bij kamertemperatuur tot het gewicht niet meer afneemt (fijnwrijven, uitspreiden in dunne laag, boven centrale verwarming leggen). De gewichtsvermindering geeft direkt het watervolume w, dat men nog met 2% vermeerderen kan omdat bij kamertemperatuur niet al het water verdwijnt. Met behulp van de andere grootheden, bepaald zoals aan zandgrond, vindt men dan ook k, l, en het gemiddeld s.g. der korrels.

Stel eens dat alle korrels even grote, ronde bolletjes waren. Denk elk bolletje opgesloten in een passend kubusvormig doosje, en al die doosjes netjes op en naast elkaar gestapeld; dan is *het poriënvolume*

$$\frac{w + l}{V} = 47,6\ \%$$

. Denk daarentegen de bolletjes in dichtste stapeling, dan daalt dit poriënvolume tot 26%. Het door ons gevonden getal, 46%, wijst dus op vrij losse stapeling.

114. De korre korrelgrootte van de grond, bepaald met de areometer.[1)]

Voor de beoordeling van de eigenschappen van een grondsoort is de korrelgrootte van fundamentele betekenis. Natuurlijk bestaat éénzelfde grondsoort uit korrels van zeer uiteenlopende afmetingen; een behoorlijk onderzoek moet ons dus de verdeling der korrelgrootten leren kennen. Men is gewoon, te bepalen welk gewichtsbreukdeel van de grond uit korrels bestaat, kleiner dan een gegeven middellijn *D*; en dit voor een aantal opeenvolgende waarden van *D*.

Nu is het aardig dat we zulk een onderzoek kunnen uitvoeren met de allereenvoudigste middelen, op het terrein. We maken daartoe gebruik van een areometer; zeer geschikt en goedkoop is een simpele ‘urinemeter’, waarmee men soortelijke gewichten tussen 1,000 en 1,060 meten kan. Het beginsel der methode is, dat men de grond met water mengt tot een papje, en dit laat bezinken. Eerst bezinken de grote, daarna de kleinere deeltjes. Een zwerm deeltjes van één bepaalde korrelgrootte daalt als geheel; de bovenste grens, gevormd door de deeltjes die van het niveau zelf der vloeistof vertrokken zijn, verplaatst zich met eenparige snelheid van boven naar beneden door de vloeistofcylinder.

De areometer wijst op elk ogenblik het s.g. aan van de vloeistoflaag waarin hij drijft, dus het s.g. van de vloeistof, waaruit alle korrels groter dan een bepaalde *D* al door bezinken verdwenen zijn. We bepalen dus op een aantal tijden *t* hoe het s.g. langzamerhand afneemt; met die tijden komen evenveel korrelgrootten *D* overeen, die op die ogenblikken net beneden het areometer-niveau waren gezonken. De overeenkomstige s.g. leren ons telkens, hoeveel van het materiaal nog niet bezonken was, dus een korrelgrootte kleiner dan *D* had.

Neem een afgewogen hoeveelheid van de grondsoort, 50 g voor zandgrond, 20 g voor kleigrond (als de inhoud van de verder vermelde cylinder 500 cm^3 is; anders naar verhouding). Wrijf de aarde door een zeef, zodat wortelvezels, blaadjes, keitjes tegengehouden worden. Doe de aarde in een beker, voeg er het dubbele volume water bij, en maak er met groot geduld een zo fijn mogelijk papje van; daartoe wrijft men de aarde zorgvuldig tussen de vingers, of drukt ze met een lepel tegen de wand van de beker.

Bij kleigrond verdient het aanbeveling, het grondmonster niet in zuiver water te suspenderen, maar in een oplossing van 1 cm^3 geconcentreerd waterglas

1) Bouyoucos, Soil Science, 1926 en 1928, - A. Casagrande, Die Aräometermethode zur Bestimmung der Kornverteilung (Berlin, 1934).

uit de handel in 1 l water. Deze werkt als ‘schutkolloid’ en belet het te vroeg neerslaan der fijnste kleideeltjes.

Het papje wordt nu *in zijn geheel* overgebracht in een hoge glazen cylinder[1)], (inhoud ongeveer 50 cm^3; een augurkjesglas is zeer geschikt), waarin men water bijvult tot een merkstreep op een paar cm beneden de rand. Sluit de cylinder met de vlakke hand en schud krachtig gedurende tenminste één minuut. Nu zet u de cylinder op de tafel, precies als de sekundewijzer van uw horloge op 0 staat, en brengt voorzichtig maar snel de areometer in de suspensie. Om te beletten dat hij naar de rand toe gaat drijven kunnen we op de cylinder een reepje karton leggen, met een gaatje in het midden, waar de steel van de areometer met zeer ruime speling in verschuiven kan. We lezen nu zo nauwkeurig mogelijk de hoogte van de waterspiegel af op de areometerschaal. De vloeistof is bruin en ondoorzichtig, we nemen dus niet de hoogte van het horizontale oppervlak, maar dat van de bovenrand van de meniskus: daar waar zich de allerkleinste luchtbelletjes verzamelen die uit de vloeistof zijn opgestegen, en die zich in een krans om de areometersteel rangschikken. We trachten, op enkele 0,0001 nauwkeurig af te lezen, en wel op de tijdstippen 10 sec, 20 sec, 30 sec nadat het bezinken begonnen is.

Dan wordt de areometer voorzichtig uit de vloeistof gehaald, afgewist of afgespoeld, en kort vóór de volgende aflezing weer langzaam in de suspensie gebracht. Dit doen we nu op de tijdstippen: 1 min, 2 min, 5 min, 15 min, 45 min, 2 uur, 5 uur, bij kleigrond ook na een etmaal en na twee etmalen. Dit herhaalde afwissen dient om te voorkomen, dat er zich aarde op het instrument zou afzetten; het uithalen en weer inbrengen van de areometer stoort niet, mits het zeer langzaam uitgevoerd wordt (het moet 5 à 10 sec duren).

Tenslotte moeten we ter contrôle nog bepalen, hoe hoog de meniskusrand in zuiver water staat. Ook nu letten we op de heel kleine luchtbelletjes en korreltjes die zich op de areometersteel afzetten (goede verlichting, zonneschijn!). Deze aflezing valt zelden samen met schaaldeel 1,000), daar de temperatuur invloed heeft, de meniskusrand hoger dan de vloeistofspiegel staat, en de ijking ook foutjes kan vertonen. Onze contrôlewaarneming leert ons ineens, welke correctie aan alle vorige aflezingen aan te brengen is.

De aldus verkregen dichtheden zijn gemiddelden, geldend voor de lagen over de gehele hoogte van de areometer. Het blijkt echter

1) Vgl. de waarschuwing tegen ontploffingen, onder aan blz. 190.

voldoende nauwkeurig, het midden der hoogte van het cylindrische areometerstuk te nemen, en dit als representatief te beschouwen. Meet ruw de diepte *A* van dit punt onder de streep 1,000, dus onder de vloeistofspiegel. Nu moeten we berekenen, welke korrels op een tijd *t* net van het vloeistofoppervlak neergezonken zijn tot dit representatieve niveau. *De wet van Stokes* geeft ons de snelheid *v*, bereikt door ronde korreltjes van middellijn *D* en soortelijk gewicht *s*, vallend in een vloeistof van soortelijk gewicht s_0 en viskositeit η:

$$v = \frac{2}{9}\,\frac{s - s_0}{\eta}\left(\frac{D}{2}\right)^2.$$

Deze wet geldt alleen, als de stroming om het vallende deeltje 'laminair' is; dit is het geval voor deeltjes kleiner dan 0,2 mm, vallend in water. Grotere deeltjes vormen wervels (vgl. § 78). Voor niet zuiver bolvormige korreltjes komt *D* overeen met een soort gemiddelde diameter. We geven het resultaat kant en klaar in een tabelletje, zowel voor zandgrond (*s* = 2,67) als voor kleigrond (*s* = 3,00), bij 15° C, terwijl men tevens een denkbeeld krijgt van de temperatuurinvloed. Het tabelletje geldt voor *A* = 8 cm; als die waarde anders is, neemt men evenredig langere of kortere tijden *t*: de korrelgrootten die in ons tabelletje aangegeven zijn blijven dan geldig.

Bezinkingstijd en korreldiameter.

bezinkingstijd *t*	**middellijn *D***	
	***s* = 2,67 en *v* = 15° C of *s* = 3,00 en *v* = 8° C**	***s* = 3,00 en *v* = 15° C of *s* = 2,67 en *v* = 22° C**
10 sec	0,103 mm	0,094 m
20	85	77
30	59	53
1 min	43	38
2	30	28
5	20	18
15	11	10
45	6_3	5_8
2 uur	3_9	3_6
5	2_5	2_3
1 etmaal	1_2	1_1
2 etmaal	0_8	0_7

We kunnen nu gemakkelijk het verband aangeven tussen het waargenomen s.g. der suspensie σ en het gewicht *W* van alle korrels met een middellijn <*D*. Deze korrels nemen in beslag het volume *W/s*, en vervangen daar het water door materie met soortelijk gewicht *s*; het gewicht van het totale volume *S* der suspensie is dus

$$S - \frac{W}{s} + \frac{W}{s} s.$$

Dat van de volume-eenheid wordt:

$$\sigma = 1 + \frac{W}{S} \frac{s-1}{s}.$$

Dus

$$\boxed{W = S \frac{s}{s-1} \cdot (\sigma - 1)}$$

We kunnen dus direkt de waarden van *W* aangeven en ook de relatieve samenstelling der korrelmassa in procenten. De berekening vindt men voor het door ons onderzochte soort zandgrond

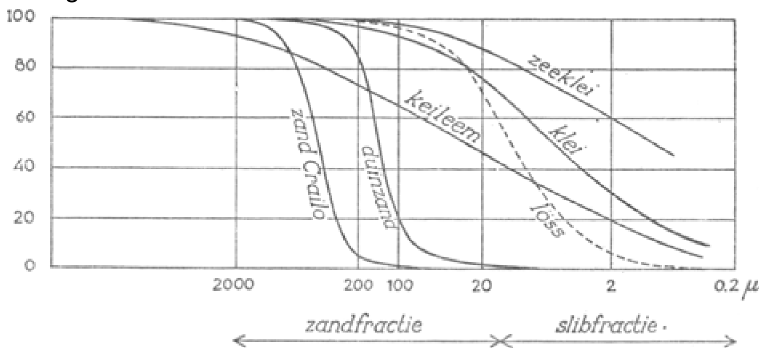


Fig. 99. Korrelanalyse van verschillende grondsoorten. Abscis: korreldiameter *D* (logoritmisch). Ordinaat: gewichtsprocent korrels, kleiner dan *D*.
Vrij naar A.S. Keverling Buisman, Grondmechanica, blz. 20 (Delft 1940).

in de hieronder afgedrukte tabel uitgewerkt, op de wijze die we thans nog precieser aangeven.

- Voor *s* hebben we een waarde gekozen 2,67 terwijl *v* = 15° C. Uit de bepalingen van § 113 zien we dat er op 89 g grond 79 g korrels waren; als we dus voor de bepaling der korrelgrootte uitgegaan zijn van 50 g grond, betekent dit feitelijk 44 g korrels op 500 cm^3 water, of 89 g op 1000 cm^3.

Bereken dus eerst *W*, met $S = 1000\ cm^3$. Reken dan de verkregen getallen om tot procenten van het korrelgewicht, door vermenigvuldigen met 100/89.

Stel uw resultaten grafisch voor, op de wijze zoals in fig. 99 gebeurd is. Hoe steiler de lijn, des te gelijksoortiger de korrels.

Korrelanalyse van zandgrond.

Bezinkings-tijd	Hoogte in mm	S.g. σ	*W* in g	%	*D*
14^s	6,4	1,0064	10,3	11,6	0,103 mm
28^s	5,4	54	8,7	9,8	,085
41^s	4,4	44	7,1	8,0	,059
1^m23^s	3,3	33	5,3	6,0	,043
2^m45^s	2,1	21	3,4	3,8	,030
6^m52^s	1,3	13	2,1	2,3	,020
20^m38^s	1,0	10	1,6	1,8	,011
$1^h\ 1^m52^s$	0,8	08	1,3	1,4	,006
4^h40^m	0,0	00	0,0	0,0	,003

De tijden zijn aangepast aan de lengte van de gebruikte areometer (*A* = 11 cm). *D* is afgelezen in de tabel blz. 195, middelste kolom. Men ziet dat slechts 11% van de korrelmassa kleiner is dan 0,100 mm, 2% is kleiner dan 0,016 mm (slibfractie).

Korrelanalyse van Groningse zeeklei. (26 g korrels op 1000 cm³)

Bezinkingstijd	S.g. σ	*W*	%	*D*
14^s	1,0160	24	92	0,093 mm
28^s	157	23_5	90	,078
41^s	155	23	88	,053
1^m23^s	150	22_5	86	,039
2^m45^s	143	21	81	,027
6^m52^s	135	19_5	75	,018
20^m38^s	122	18	69	,010
$1^h\ 1^m52^s$	60	9	35	,005
4^h40^m	50	7_5	29	,003
7^h	25	4	16	$,002_3$
11^h	15	2_5	10	,002

De slibfractie bedraagt hier 73%.

Het verdient aanbeveling, de eerste areometeraflezingen te controleren; het is heel eenvoudig, na afloop der 5^m-aflezing, opnieuw te schudden en ditmaal een volledige reeks op te nemen. Na afloop der bezinkingsproef kunt u opmerken hoe fraai de korrelgrootten gesorteerd zijn. Men ziet hoe de kleur over de hoogte van de bezonken cylinder verandert; beneden ligt het zand,

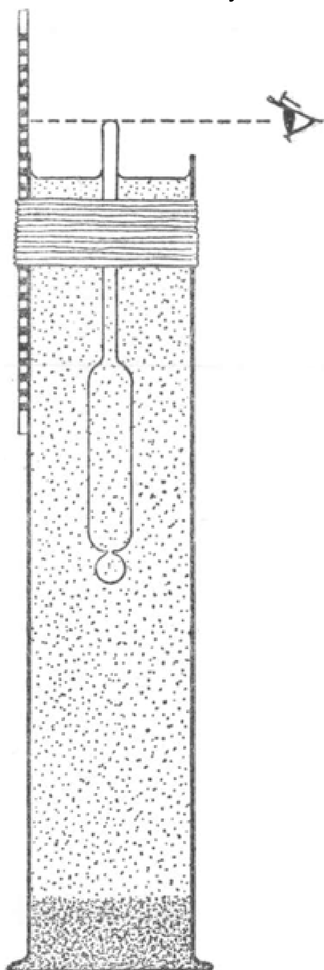


Fig. 100. Korrelanalyse met de areometer (verbeterde afleesmethode).

boven de klei. De hoogte der verschillend gekleurde lagen geeft al een eerste indruk van de samenstelling.
Bij zandgrond komt het dikwijls voor, dat na 10 sec reeds het grootste gedeelte bezonken is; men vindt dan alleen het rechtse stuk der korrelkurve. Voor de zeer grove deeltjes moet het onderzoek met behulp van zeven aangevuld worden.
De aflezing van de meniskus geeft dikwijls moeilijkheden. Veel nauwkeuriger en prettiger werkt men, door een spiegeltje, waarop een millimeterschaaltje geplakt is aan de cylinder te binden; men leest dan de hoogte af van het bovenste topje van de areometersteel, gebruik makend van het spiegeltje om zeker te zijn dat men loodrecht op de schaal kijkt. Evenals hierboven beschreven, wordt de areometer door een kartonnetje geleid. Het peil der vloeistof bepaalt men met een speld, door dit kartonnetje geprikt, tot de speldepunt net aan de vloeistof raakt; de stand van de speldeknop wordt op de schaal afgelezen, en men brengt de lengte van de speld in rekening. Evenzo doet men bij schoon water. De afstanden in mm zijn gemakkelijk genoeg om te rekenen in s.g., door vergelijking met de schaal die op de areometer staat. - De gegevens van ons getallenvoorbeeld zijn op die manier verkregen. Bij klei is deze verfijnde methode nauwelijks nodig.

115. Maximale hellingshoeken.

Elke soort materiaal heeft zijn eigen natuurlijke *hellingshoek*: het is de grootst mogelijke helling ten opzichte van de horizontaal die een hoop van dit materiaal vertonen kan. De hellingshoek is des te groter naarmate de korrels *kleiner* zijn, *lichter* en *hoekiger*, in 't algemeen, naarmate de wrijving groter is en de korrels minder gemakkelijk onder elkanders drukking uitwijken.

Hier volgen enkele hellingshoeken:

zand (droog)	34°-36°
zand (vochtig)	40°
zand (verzadigd met water)	25°
leem (droog)	40°-50°
leem (nat)	20°-25°
klei (droog)	48°-50°
klei (nat)	20°-25°
rolstenen (hoekig)	45°
rolstenen (afgerond)	30°
steenkolen	45°-50°

Het bestaan van zulk een constante helling is eigenlijk hoogst merkwaardig. Men zou verwachten dat de onderste lagen, die de grootste drukking ondergaan, de geringste helling vertonen, en dat de steilheid dus van beneden naar boven geleidelijk toeneemt. Dat dit niet het geval is, bewijst dat de drukking zich in dit materiaal slechts over kleine afstanden voortplant.

Bepaal zelf hellingshoeken van zulk een 'natuurlijk talud' in allerlei verschillende omstandigheden! Het schijnt dat zij onder water dezelfde waarde hebben als in lucht, indien men de werking van stromingen en golven kan uitschakelen.

116. Evenwichtsfiguren van zand.[1)] (fig. 101)

Met *goed droog* duinzand kan men prachtig experimenteren; hoe grover en ronder de korrels, hoe minder verontreinigingen, des te beterl We onderzoeken de vormen die het zand aanneemt als men het uitgiet op een plank of plaat van bepaalde omtrek; daarbij giete men niet al te ruw, noch al te voorzichtig: in geen van beide gevallen zou men de volledige, stabiele evenwichtsfiguur verkrijgen.

1. Een horizontaal vlak met een muur. - De natuurlijke hellingshoek; boven en onder een geringe afronding, die een denkbeeld geeft van de afstand waarover zich de invloed van een deeltje doet gevoelen.
2. Lange rechthoekige plaat. - Dakvorm, randwerking beneden.
3. In een kist. - Natuurlijke hellingshoek met randwerkingen.
4. Cirkelvormige schijf. - Kegel met afgeronde spits; beneden: randwerking.
5. Cylinder met doorboorde bodem. - Kratervorm; de steilheid naar de opening toe groter wordend.
6. Doorboorde schijf. - Ringwal; bemerk hoe de helling stelselmatig van de normale hellingshoek afwijkt, en hoe de graatlijn daardoor asymmetrisch verschoven is.
7. Vierkant. - Pyramide met afgeronde kanten en afgeronde top, randwerking aan de basis.
8. Cirkelveelhoek. - De zandfiguur vertoont een grotere steilheid der graatlijn naarmate men hoger komt.
9. Ellips. - Elliptische kegel met rechte, horizontale graatlijn.
10. Kruis. - Ingewikkelde, fraaie zandfiguur.

Bij het maken der zandfiguren voelt men onwillekeurig dat er algemene beginselen moeten zijn die deze zo regelmatige

1) Auerbach, Ann. Phys. **5**, 170, 1901.

'vanzelf' ontstaande vormen bepalen. - Trek in gedachte over het oppervlak der zandfiguur lijnen van constante hoogte (isohypsen). *Overal waar de isohypsen bol zijn* (naar buiten con-

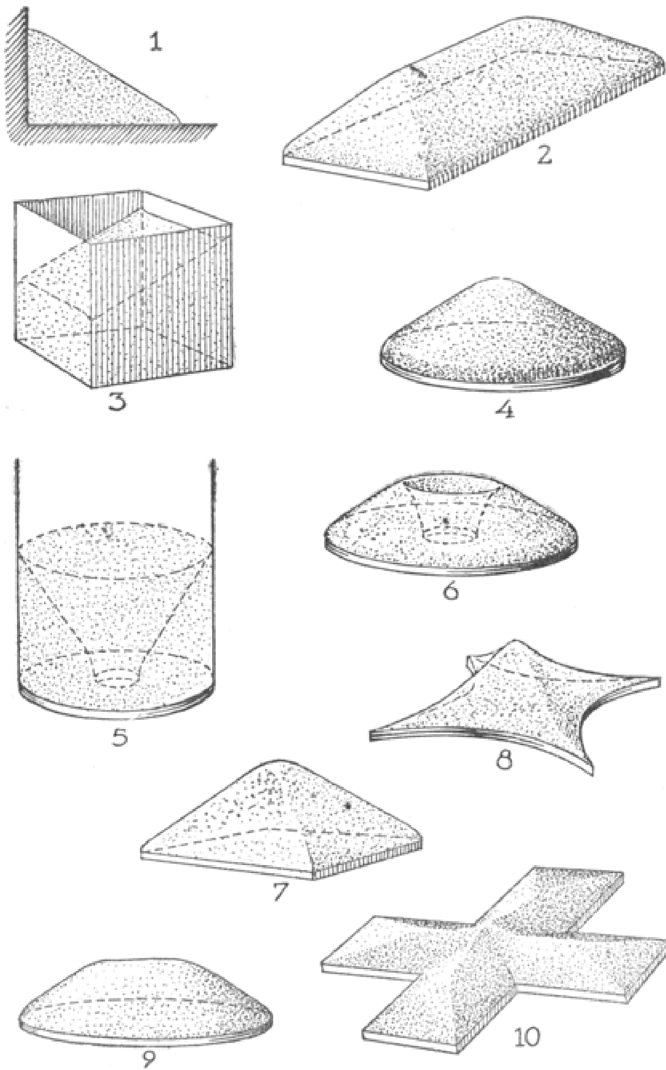


Fig. 101. Evenwichtsvormen van zand op platen van verschillende vorm.

vex) *is de helling abnormaal klein*, *waar de isohypsen hol zijn is ze abnormaal groot*; de vooruitspringende hoeken der isohypsen zijn des te sterker afgerond, naarmate de ribben daar sterker opstijgen. Deze regel geeft de verklaring van de figuren 4, 5, 6, 7, 8. De afwijking van de normale helling is des te aanzienlijker naarmate de korrels groter zijn.

'Maximaalprincipe': om de hoogte van de figuur boven een bepaald punt van het grondvlak te vinden, zoekt men de veelhoek, in het grondvlak bevat, die voor dat punt de grootst mogelijke hoogte zou geven; de overige delen van het grondvlak hebben dan verder geen invloed. (Toepassen op nr. 10 b.v.).

117. Zandvormingen in zandhopen en duinen.

Een zandhelling is in een merkwaardig evenwicht. Neem onder aan de helling een handvol zand weg: plaatselijk is nu de grootste mogelijke hellingshoek overschreden, de holte verplaatst zich steeds meer naar boven, tot de gehele schuine laag weggegleden is en de hellingshoek overal weer normaal wordt (fig. 102). Het is niet gemakkelijk te zeggen waar de (goed meetbare) voortplantingssnelheid der evenwichtsverstoring van afhangt.

Waar een hoop zand en keien vochtig geworden is van de regen en nu in de hoog aan de hemel staande zon te drogen ligt, vormen zich soms merkwaardige *zandpyramiden*[1]. Naarmate het zand droogt rolt het naar beneden; maar de keien beschaduwen het onder hen gelegen zand, dat dus langer blijft staan, zodat er een aantal

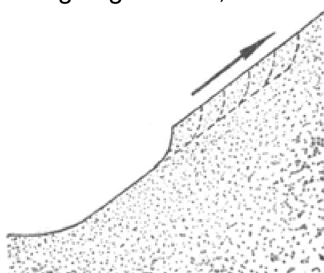


Fig. 102. Het voortlopen van een uitholling langs een zandhelling.

kleine zandtorentjes opsteken, ieder met een kei bekroond. Zulke vormingen ziet men veel aan zandhopen op terreinen waar er gebouwd wordt.

Zijn er geen keien, dan bemerkt men dikwijls in de helling een aantal evenwijdige schuine geultjes; ook bij de duinen zijn die wel waar te nemen. Die geultjes zijn uitgeslepen door de naar omlaag rollende losse korretjes in de nog samenhangende, vochtige onderlaag. Zodra zich ergens zo'n geultje gevormd heeft, lopen de vallende zandkorrels daar bij voorkeur naartoe en graven het verder uit: de toestand is dus labiel. Tussen de geultjes staan

1) Met. Zs. **6**, 1889.

plaatjes, muurtjes van zand, die blijkbaar toevallig iets harder waren en daardoor gespaard zijn gebleven (Plaat XII).

Weer elders holt de wind gaten uit in de duinen. In die gaten vormen zich windwervels, zodat de eenmaal ontstane uitholling zich snel verder ontwikkelt. Zulke windholten kunnen enige decimeters maar soms ook enige meters middellijn bereiken.

118. Drijfzand.

Op sommige punten van ons strand heeft het zand een verrassend losse samenhang. Het oppervlaktelaagje is min of meer vast, maar daaronder kan men een stok zonder moeite ineens diep in de grond duwen; het is een griezelig gevoel als men de voet op zulk een laag zet, en de hele laag als pudding voelt schudden! De gevaren van drijfzand zijn dikwijls romantisch overdreven. Meestal kan men er wel zonder gevaar overheen komen, maar paarden of wagens zakken er door hun zwaarder gewicht diep in en kunnen niet meer losgemaakt worden. Dus toch voorzichtig!

Strekt het drijfzand zich slechts over een kleine oppervlakte uit, dan kan men het weerstandskrachtiger maken door er met stangen in te roeren. Beproef dit!

De oorzaak van deze bijzondere vormingen is het opstijgen van regenwater dat uit de duinen neerdaalt en het strand doordrenkt; het water wordt tussen de korrels geperst, en deze kunnen nu gemakkelijk over elkaar rollen en schuiven met slechts geringe wrijving. Een dergelijk terrein met drijfzand bevindt zich op Terschelling, bij het meertje van de Bosplaat.

Ook op onze heide komt drijfzand hier en daar voor, bij bepaalde weertoestanden, wanneer namelijk de naburige heuveltjes met water doordrenkt zijn.

Een geheel ander soort drijfzand vormt zich soms, wanneer het zand gemengd is met bepaalde verontreinigingen, bv. enkele procenten fijne klei. Dit geval kunnen we herkennen, door een kleine hoeveelheid van het zand in een reageerbuisje te schudden; het moet dan vloeibaarder worden, terwijl het weer een vaster consistentie aanneemt, als men het rustig laat liggen ('thixotropie').[1)]

1) H. Freundlich, Thixotropie, blz. 39 (Paris, 1935).

119. Dilatantie van zand.[1]

Bij ebbe blijft het strand vochtig achter. Overal waar u dan trapt ziet u het om uw voet wit worden, klaarblijkelijk wordt het ineens droog.

U denkt dat de druk van uw voet het zand heeft samengeperst? Maar als dat zo was, dan zou het water nu in de capillaire tussenruimten tussen de zandkorrels minder plaatsruimte hebben dan eerst; het moest dus juist te voorschijn gekomen zijn aan het oppervlak! Er is maar één besluit mogelijk: *de druk van uw voet heeft het zand niet samengeperst*, *maar het integendeel doen uitzetten*!

Dat is nu weer begrijpelijk, omdat de zandkorrels goed dooreengeschud waren door het water, en ongeveer in de dichtst mogelijke pakking opeengestapeld waren. Elke verandering in de rangschikking kan het volume slechts vergroten, zodat dus de druk van de voet het zand doet uitzetten (‘dilatantie’ van Osborn Reynolds). Het peil van het water zakt dus, niettegenstaande de capillaire aantrekking in de fijne tussenruimten. Na enige tijd is het echter weer opgestegen, en de witte kleur verdwijnt. Heft men dan de voet weer op, dan keren de zandkorrels terug in hun vroegere dichtste stand, en het overtollige water verschijnt ineens aan het oppervlak.

Als die verklaring goed is, moet het zand niet alleen *om* de voet maar ook vlak *onder* de voet wit geworden zijn. Proef: leg een stukje dik glas op het natte zand, en druk daar plotseling zeer krachtig met een stok op. Het zand wordt niet alleen wit in de omgeving, maar ook onder de glazen plaat.

‘Als men aan de tweehonderdduizend miljoen mannen, vrouwen en kinderen, die sedert de schepping der wereld over vochtig zand zijn gegaan, gevraagd had: “wordt het zand onder uw voet samengeperst?”, hoeveel zouden dan vóór de vergadering der British Assocoation te Aberdeen in 't jaar 1885 anders dan “ja” hebben geantwoord?’[2]

Evenzo verschijnt er een witte streep achter de wielen van een fiets of van een auto die over vochtig zand rijdt, even daarna verdwijnend. Bij een fiets is die streep een 40 cm lang, hetgeen bewijst dat na ongeveer 0,15 sec de dichtste pakking zich in hoofdzaak hersteld heeft.

Men heeft dikwijls opgemerkt, dat het half vochtige zand vaster

1) O. Reynolds, Phil. Mag. **20**, 469, 1885.
2) W. Thomson, Vorlesungen über Molekulardynamik, blz. 524 (Teubner 1909).

aanvoelt bij het lopen dan het met water doordrenkte of dan het geheel droge. Deze regel is echter lang niet algemeen. Bij het fietsen langs ons strand is het opvallend, hoe de vastheid ook bij gelijke bevochtiging van de ene plaats tot de andere sterk verschilt, hetgeen stellig toe te schrijven is aan plaatselijk dichtere of lossere pakking; deze moet zelf weer verband houden met de grotere of geringere beweging van het zeewater, waaruit dit zand bezonken is.

Men maakt van de dilatantie gebruik bij het bouwen en bij wegenaanleg: door alle zandlagen goed te bevochtigen verkrijgt men dat de korrels zich in dichtste pakking rangschikken en dat de laag weerstandskrachtiger wordt.

120. Verstuivingsvormen van zand en sneeuw.[1)]

> *Ik betwijfel of er op het gebied van de levenloze natuur een voorwerp te vinden is van even volledige schoonheid als een door de wind opgewaaide sneeuwhoop*, *gezien bij warme verlichting. Zijn lijnen hebben een volmaaktheid en een wisselvalligheid waarvan men zich nauwelijks een voorstelling kan maken*; *de sierlijkheid van zijn oppervlak wordt nog verhoogd door zijn doorschijnendheid*; *een licht en schaduw van onuitputtelijke verscheidenheid en onnavolgbare gaafheid*; *de slagschaduwen scherp*, *bleek*, *en hemelkleurig; het teruggekaatste licht fel en veelvoudig*, *hier en daar gemengd met de zachtheid van het doorgelaten licht*.
> (*Ruskin*, *Frondes Agrestes*).

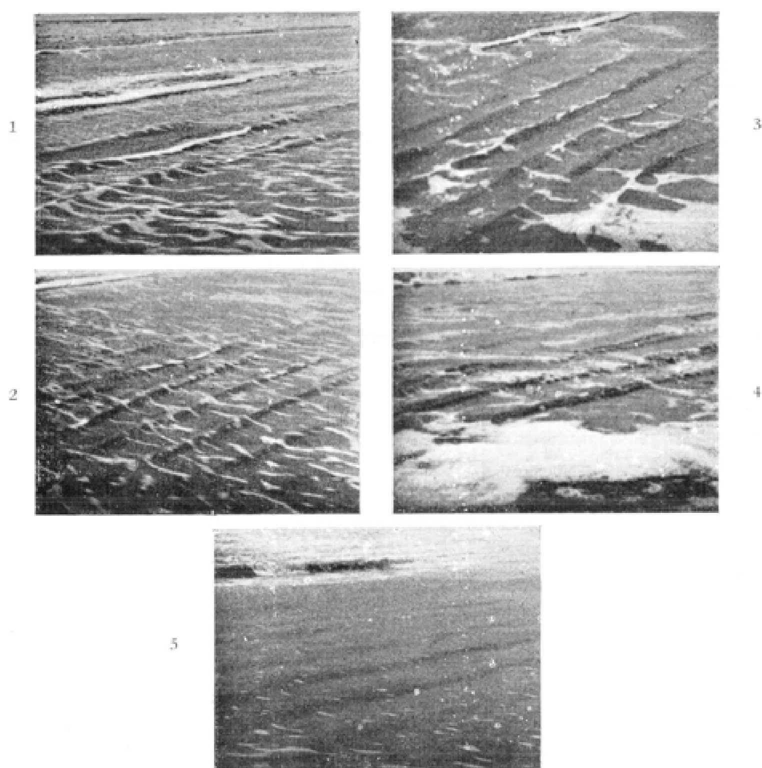
Aan het strand vooral hebben we dikwijls gelegenheid op te merken in welke fraaie vormen het zand dat de wind meevoert nabij hindernissen neervalt; en dergelijke waarnemingen kan men ook bij iedere sneeuwbui uitvoeren, waarbij echter de verstuivingsfiguren enigszins anders uitvallen naar gelang de sneeuw meer fijnkorrelig en poedervormig is, of uit zware vlokken bestaat.

A. Als de hindernis de wind *doorlaat* en uit *buigzame* halmen en bladeren bestaat, dan valt het zand eerst achter de struik neer; blijkbaar heeft de wind snelheid verloren door de wrijving tegen de takken, en kan hij dan een groot gedeelte van het zand niet meer meevoeren (fig. 103*a*). Gaandeweg groeit de zandhoop, begraaft de struik, en neemt het kenmerkend profiel aan dat fig. 103*b* in overlangse en dwarse doorsnede vertoont. Het is de verdienste van Vaughan Cornish, te hebben aangetoond dat

1) Vaughan Cornish, Geogr. Journ. **20**, 137, 1902. - Waves of Sand and Snow.



PLAAT IX.
Zandribbels in een mui, tegen de waterstroom in bewegend, waarvan de snelheid groter is dan de kritische (§ 121).
Boven iedere ribbel bevindt zich een watergolfje, dat zich met hem mee verplaatst.
Naar Vaughan Cornish, Waves of Sand and Snow, blz. 275.



PLAAT X.
Vorming van terugloopzandgolven (§ 121).
Naar P.D. Timmermans, Proeven over de Invloed van Golven op een Strand, blz. 375.
1. Het eerste optreden van de enkele cm hoge golven in de terugloop. - 2 en 3. De terugloop is in volle gang, steile golfjes zijn ontstaan die men op fig. 4 ziet breken. - 5. Een laatste dunne laag water vloeit af, de ribbels zijn gevormd; op de achtergrond een nieuwe, oplopende golf.
Cliché in bruikleen van het Geologisch Instituut te Leiden.

deze veel voorkomende vorm nog geen eindtoestand is; door nog meer zand (of sneeuw) wordt de verstuivingsvorm tenslotte aangevuld tot een soort visvorm, die het stompe uiteinde naar de wind toe keert (fig. 103*c*). 't Mooist komt die vorm te voorschijn, als wit zand over donkere grond is verstoven. Het is de ideale stroomlijnvorm, de vorm van kleinste weerstand, die we reeds bij vorige waarnemingen hebben leren kennen (§ 80).

B. Als de hindernis de wind *doorlaat* maar uit *starre* delen bestaat, dan wordt van meet af aan het zand vóór, in, en achter die hindernis afgezet. Vb.: een grotere struik.

C. Als de hindernis de wind *niet doorlaat* en *zeer groot* is,

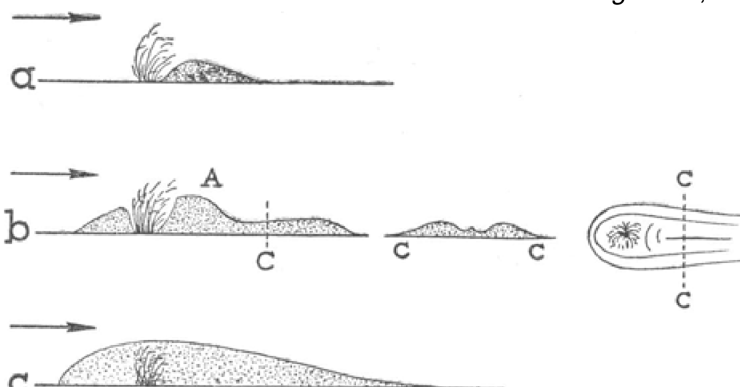


Fig. 103. Verstuivingsvormen van zand om een struik.
a) Het begin der verstuiving. *b*) Verder gevorderd stadium. *c*) Eindstadium (wordt zelden bereikt).

wordt de wind al iets vóór de hindernis vertraagd, zodat daar zand neervalt; tevens vormt zich echter een wervel vlak vóór de hindernis, en het zand wordt daardoor uitgehold. Vb.: een lange wal, een muurtje. Op een afstand van het muurtje, even groot als de hindernis hoog is, ontmoet de terugwervelende lucht de aankomende hoofdstroom; dáár ontstaat een punt waar het betrekkelijk windstil is, en daar is het dat zand of sneeuw zich afzetten en dikwijls een walletje vormen.

D. Als een hindernis de wind *niet doorlaat* maar *geringe afmetingen* heeft, krijgt men ook de zandafzetting en de uitholling vóór de hindernis; maar daarenboven neemt de wind aan beide kanten zand mee, en zet het af in het windstille gebied achter de

hindernis, als een soort zandstaartje. Vb.: een boom of een paal (fig. 104). De wind heeft ook de korrels gesorteerd: de grove liggen aan de windzijde, het fijne zand is naar de lijzijde vervoerd.

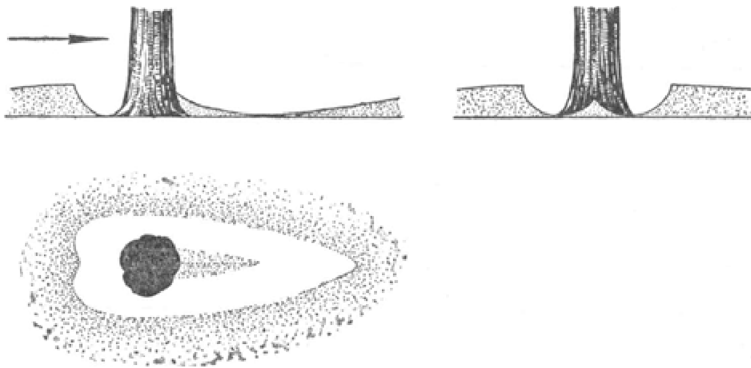


Fig. 104. Verstuivingsvorm van sneeuw om een boomstam.

- Iets dergelijks gebeurt in 't klein bij elk schelpje, bij elk steentje aan 't strand: telkens vormt zich een soort zandtong achter het steentje, en een holte ervoor; tot de steen valt en het spel opnieuw begint.

Bij sterkere en aanhoudende wind wordt zand zowel vóór als

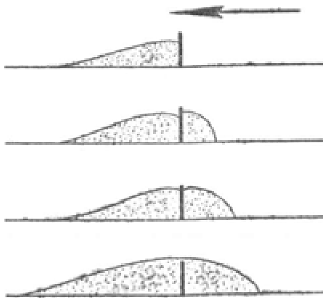


Fig. 105. Verstuivingsvormen van sneeuw om een paaltje.

achter het paaltje opeengehoopt. De twee bergen worden zo hoog dat een niet te hoog paaltje eronder bedolven wordt, en ze versmelten tenslotte tot dezelfde visvorm die we al om een struik hebben aangetroffen (fig. 105).



Fig. 106. Verstuivingsvormen van sneeuw achter een hek.

In fig. 106 zijn de opeenvolgende stadia van de zich achter een hek vormende zand- en sneeuwhoop door de verschillende lijnen voorgesteld. De merkwaardige, steile afval aan de lijzijde verschuift verder en verder, wordt lager, tot het geheel weer

ongeveer de visvorm heeft aangenomen. In onze streken is er eigenlijk geen kans ooit een dergelijke volledige ontwikkeling mee te maken; zelfs in landen met veel sneeuw duurt het soms een geheel winterhalfjaar tot een bepaalde sneeuwhoop 'volgroeid' is.

121. Asymmetrische ribbels van zand en water.[1] - (Platen VIII, IX, X).

Wie langs het zeestrand gewandeld heeft kent ze, die sierlijke rimpelingen in het zand, zo regelmatig en toch. zo veranderlijk. Dat zij een soort beeld van de watergolven zouden zijn, is een zeer naïeve voorstelling die men hier en daar horen kan maar elke grond mist: vergelijk maar de gemiddelde golflengte! Over zandribbels bestaat een omvangrijke litteratuur; maar alleen al het feit dat we nog geen bruikbare formule hebben om hun zo opvallend regelmatige golflengte te berekenen, bewijst hoe onbevredigend onze kennis nog is. Voor nieuwe waarnemingen is er hier ruim gelegenheid!

We onderscheiden:

1. asymmetrische zandribbels = stroomribbels (Strömungsrippeln = current ripples = dunes);
2. symmetrische zandribbels = oscillatieribbels (Seegangsrippeln = oscillation ripples = rides de fond).

De eerste ontstaan als het water in één richting over het zand stroomt; de tweede, als het klotsen der golven een heen- en terugstromen van het water veroorzaakt.

Beide stelsels vindt men dikwijls prachtig vertegenwoordigd in de plassen achtergebleven zeewater, die men met de naam 'zwin' aanduidt, en die vrijwel overal langs ons strand voorkomen. Is bij ebbe het water van het zwin weer naar de zee gestroomd door zogenaamde 'muiden', dan kan men waarnemen hoe de oscillatieribbels in het eigenlijke zwin overheersen, terwijl bij de muiden de stroomribbels geheel de overhand krijgen. Daar is het dat men de allergrootste ribbels moet zoeken; als getij en wind hebben samengewerkt om in het gehele zwin een sterke stroming te doen ontstaan, kan men er soms asymmetrische ribbels van 1 tot 2 meter golflengte waarnemen; zij zijn zelf

1) Darwin, Proc. R. Soc. **36**, 18, 1883. - Vaughan Cornish Geogr. Journ. 1901. - Vaughan Cornish, Waves of Sand and Snow. - F. Exner, Ergebn. d. Kosm. Physik, 1, 378, 1931. - Vaughan Cornish, Ocean Waves and kindred geophysical Phenomena (Cambridge, 1934). - P.D. Timmermans, Proeven over den Invloed van Golven op een Strand. Diss. Leiden, 1935.

bezet met kleine, eigenaardig slingerende stroom- en oscillatieribbels. - Ook buiten het eigenlijke zwin komen stroomribbels voor, en wel bij de hoogwaterlijn, waar alleen de laatste uitlopers der enkelvoudige golven gekomen zijn, en zich geen heen- en weergaande golven hebben kunnen ontwikkelen; meer naar de zee toe beginnen dan meestal de symmetrische ribbels. - Asymmetrische ribbels vormen zich aan de oevers van meren en rivieren, zelfs in kleine beken (§ 78), of in het zand langs de weg als er een stortbui over gespoeld is. - Zeer indrukwekkend zijn de getijribbels in de mondingen onzer grote rivieren,

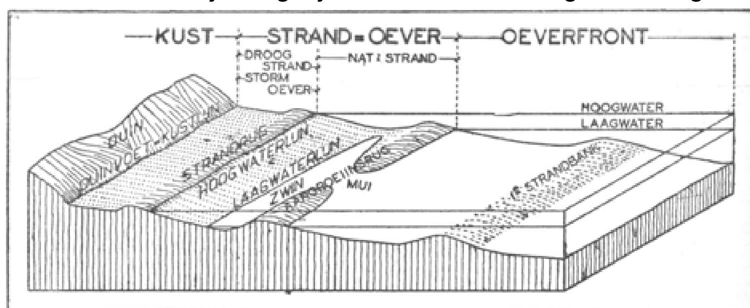


Fig. 107. Schematische doorsnede van de Nederlandse kustvormingen. (naar Escher, in Timmermans, t.a.pl. blz. 67).

die bij laag water een echte kaart vertonen waaruit men overal de stroomlijnen kan aflezen; ze worden tot 10 m lang en 65 cm hoog; dikwijls vormen zich in de dalen plassen water, die door hun merkwaardig regelmatige opeenvolging opvallen. In de waddenzee bij Bremen bereiken deze vormingen een golflengte van 250 m en een hoogte van 9 m! *Alle stroomribbels staan loodrecht op de stroomrichting van het water*.

Een grote steen verstoort de regelmaat van een stelsel evenwijdige ribbels; we nemen waar dat ze ombuigen, en overal loodrecht op de rand van de steen gericht zijn: een bewijs dat de vloeistofstroom om de steen spoelt en evenwijdig aan zijn oppervlak loopt. Nabij een kademuur zijn daartegen de ribbels dikwijls evenwijdig aan de muur, hetgeen wijst op het bestaan van stijgende en dalende stromingen.

Beschrijf nauwkeurig de vorm van de ribbels en zoek naar de oorzaken die er invloed op uitoefenen. Meet bijvoorbeeld:

de golflengte λ der ribbels (meest 6 tot 20 cm); is alleen behoorlijk te meten als het water weggelopen is, of door de maatstok onder water te houden; het schatten zonder vergelijkingsmaatstaf van een voorwerp onder water valt meestal erg foutief uit;

de hoogte *h* der golfbergen boven de golfdalen (bv. 0-2 cm); het nauwkeurigst te bepalen door een draad te spannen, en de afstand daarvan boven de bergen en boven de dalen te meten; h/λ is ongeveer 1:18;

de asymmetrie der twee hellingen van een ribbel;

de lengte der kammen (ruwe schatting);

de korrelgrootte van het zand;

de snelheid van het water;

de diepte van het water;

de snelheid waarmee de ribbels bewegen: twee stokjes in de grond langs dewelke men viseren kan, en waarvan de denkbeeldige verbindingslijn ons als vast merkteken dient; het volgen en meten van deze voortkruipende beweging is een zeer belangwekkend werkje!

Dit laatste punt vergt enige toelichting. Wanneer water met toenemende snelheid over een zandoppervlak stroomt, zijn er verschillende kritische snelheden te onderscheiden. 1) De ribbels vormen zich slechts bij een zekere minimum-snelheid, die voldoende moet zijn om de zandkorrels mee te voeren. De vereiste snelheid *u* wordt gegeven door de vergelijking[1)] $u^2 = 6\ \rho - \rho' / \rho'\ gd$, waarin $\rho = 2{,}5$ het soortelijk gewicht van zand is, $\rho' = 1$ dat van water, $g = 981$ de versnelling van de zwaartekracht, d = de middellijn der korrels in cm. Met deze waarden wordt $u = 94\sqrt{d}$; voor korreltjes van 0,015 cm is dus een stroomsnelheid van 12 cm per sekunde vereist. De gevormde ribbels bewegen met de stroom mee, met een snelheid van enige millimeters per minuut; ze zijn dan sterk asymmetrisch, met de steile zijde stroomafwaarts. 2) Bij snelheden in de buurt van 75 cm/sec staan de ribbels stil en krijgen een vlak profiel; de gehele bovenlaag van het zand komt in beweging, wordt zwevende gehouden, en de ribbels worden weggeveegd. 3) Beweegt het water nog sneller en is het ondiep, dan keren ze hun steile zijde stroomopwaarts, en bewegen in een breed front *tegen de stroom in* ('Antidünen')! Hun snelheid kan dan wel 1 cm/sec bedragen; men ziet het

1) Naar Jeffreys in: Vaughan Cornish, Ocean Waves and kindred geophysical Phenomena.

water over zijn gehele diepte troebel worden door het opgewervelde zand[1]. Zeer mooi kan men deze vorming dikwijls aan het strand waarnemen als de laatste uitloper van een golf terugvloeit, eerst langzaam, dan sneller en sneller: indien een voldoende snelheid bereikt wordt, rimpelt zich ineens de gehele zandoppervlakte. Van langer duur zijn de zandgolven die stroomopwaarts bewegen in de mui, door dewelke een zwin leegloopt (Platen IX, X).

Bij zeer ondiep water (1,5 cm) zijn de golflengten onregelmatig, maar in water van 14 cm diepte zijn ze al zeer standvastig. Bepaal *de veranderlijkheid der golflengte* door elke ribbel met de volgende te vergelijken en

$$\left| \frac{2(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 + \lambda_2} \right|$$

op te maken.

Forel geeft een fraaie manier aan om het profiel der zandribbels in ondiep water te bestuderen. Hij legt op de bodem een raampje, bestaande uit 4 latjes, en giet daarin een dikke brij van gips. Deze bezinkt en vormt weldra een vaste massa die het getrouwe afgietsel is van de zandribbels en die men kan bewaren.

Het kan echter veel eenvoudiger. Neem een reep stevig papier, steek hem in 't zand loodrecht op de ribbels, en trek daarop het profiel met een potlood na. - Voor lange profielen neemt men liever een zinken plaat, waarop men met rood potlood tekent.

Als het water zich heeft teruggetrokken kan men de ribbels aandachtiger bekijken (loupe gebruiken!). Was de waterbeweging langzaam, dan vindt men dat de stroomopwaarts gekeerde glooiing uit fijn zand bestaat, de steile lijzijde daarentegen uit grove korrels; blijkbaar was de stroom niet eens snel genoeg om de fijne korrels op te lichten en zwevende te houden. Waar het water snel vloeide is de korrelstruktuur juist de tegenovergestelde: de grove korrels vormen hier een pantser dat de stroomopwaarts gekeerde zijde beschermt, de fijne zijn weggespoeld en aan de lijzijde verzameld, blijkbaar door de wervel die achter de ribbel gevormd wordt (zie verder).

Het is zeer belangwekkend het eigenlijke ontstaan der asymmetrische ribbels te bespieden. Bij het terugvloeien van een brandingsgolf ziet men enige ribbels zich vormen, de ene na de andere in snelle opeenvolging. De volgende golf verstoort ze weer. Heeft men door merktekens aangegeven waar zich de golfbergen bevonden, dan bevindt men dat ze een volgende maal op geheel andere plaatsen verschijnen, hoewel de golflengte dezelfde is.

1) *Vraag*: is die waargenomen omslag bij 75 cm/sec niet eenvoudig daarvan afhankelijk of het water langzamer of sneller stroomt dan de kritische snelheid $\sqrt{H}$ der langst mogelijke golf? (vgl. § 77).

Het ontstaan der ribbels is dus niet veroorzaakt door een plaatselijke eigenaardigheid van de grond. - Stoor een ribbel op een bepaald punt terwijl het water stromende is: hij herstelt zich; ribbels die goed gevormd zijn worden niet meer gewijzigd door een zwakke, anders gerichte stroming. Een eenmaal gevormde ribbel heeft dus een zekere bestendigheid in de gehele groep. - Maak het zand effen met een plankje: grote korrels of toevallige oneffenheden worden de kiem van nieuwe ribbels. Hoe effener en gelijkmatiger het oppervlak, hoe langer het duurt eer de ribbels zich weer vormen.

De zandribbels ontstaan dus aan toevallige kleine hobbels van het zandoppervlak. Klaarblijkelijk stroomt de vloeistof in

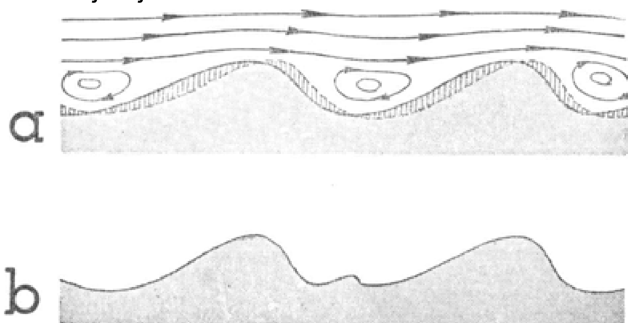


Fig. 108. *a*) Vorming en verschuiving van de zandribbels door stromend water. Voluitgetrokken: de toestand van het oppervlak op een bepaald ogenblik; gestippeld: het oppervlak een ogenblik later. *b*) Een kleine ribbel tussen twee grote bevindt zich precies bij de sterkste werveling en verdwijnt.

de nabijheid van zulk een hindernis op zodanige wijze, dat de ribbel groeit: hij wordt hoger, het dal tussen twee ribbels dieper; en tevens nemen we waar, dat de ribbbel langzaam in de stroomrichting verschuift (fig. 108). Er moet dus zand weggehaald zijn van de onderkant der opwaartse helling, en dat moet neerslaan iets achter de top. Dit is wel begrijpelijk, wanneer we weten dat laboratoriumproeven hebben aangetoond, hoe zich achter elke ribbel een werveltje vormt. Het wordt dan ook duidelijk, dat een klein ribbeltje tussen twee grote in (fig. 108*b*), zich precies bevindt op de plaats waar het zand het sterkst wordt uitgehold, en dus spoedig verdwijnt. Zo is er een wedstrijd tussen de ribbels, waarbij de grote de kleine opslokken! En het komt tenslotte tot een evenwichtstoestand, waarbij alle ribbels ongeveer even

groot zijn. Het voortbewegen der ribbels gebeurt, doordat een stroom van voldoende snelheid de korrels oplicht die aan de windzijde liggen, en doordat de werveling achter de ribbel hen naar de lijzijde overbrengt. - Voorlopig is dit verhaal nog slechts kwalitatief: een kwantitatieve formulering zal zeer ingewikkeld zijn. Men ziet wel in, dat de zandribbels op heel andere wijze ontstaan dan de watergolven, en dat de gelijkenis der vormen slechts een oppervlakkige is: bij zandribbels plant zich de beweging slechts voort tot een diepte van enkele korrels; bij watergolven tot een diepte van de orde der golflengte en meer. Het is zelfs de vraag of men bij dergelijk korrelig materiaal als zand nog wel van ‘golven’ spreken kan.

Al lang geleden heeft Helmholtz aangetoond, dat twee lagen van verschillende snelheid, die over elkaar schuiven, golven vormen aan het grensvlak. Men heeft beproefd de zandribbels op te vatten als een bijzonder geval van een dergelijke golfvorming, en er de formule van Helmholtz op toe te passen:

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \frac{v^2}{\frac{\rho}{\rho'} - 1}.$$

(*v* =snelheid van het water; ρ, ρ' = dichtheid van zand en water). Deze formule schijnt echter slecht te kloppen; het is waar dat men voor ρ eigenlijk niet 2,5 moet nemen, de dichtheid der zandkorrels, maar veeleer de dichtheid van het met water doordrenkte zand; evenzo is ρ' veeleer de dichtheid van de waterlaag waarin veel zand zwevend gehouden wordt. Maar uit de meting van λ zou men moeten besluiten dat ρ/ρ' niet veel meer dan 1,2 kan zijn, en dat is wel zeer onwaarschijnlijk; ook dan ware het trouwens niet geheel in orde[1].

Hahmann[2] heeft door proeven laten zien dat de golflengte in ijzervijlsel precies dezelfde is als in zand. De gehele opvatting dat we hier met golven volgens Helmholtz te maken hebben moet dus fout zijn. - Vraag: bij Hahmann is de golflengte slechts weinig afhankelijk van de stroomsterkte, weinig van de korrelgrootte. Hoe is dan de grote verscheidenheid der golflengten in de natuur te verklaren?

122. Symmetrische ribbels van zand en water.

Deze ontstaan aan 't strand, op de bodem van stilstaande wateren en rivieren, wanneer zich golven op het water vormen. Op enige diepte verdwijnen ze, want de golfbeweging neemt

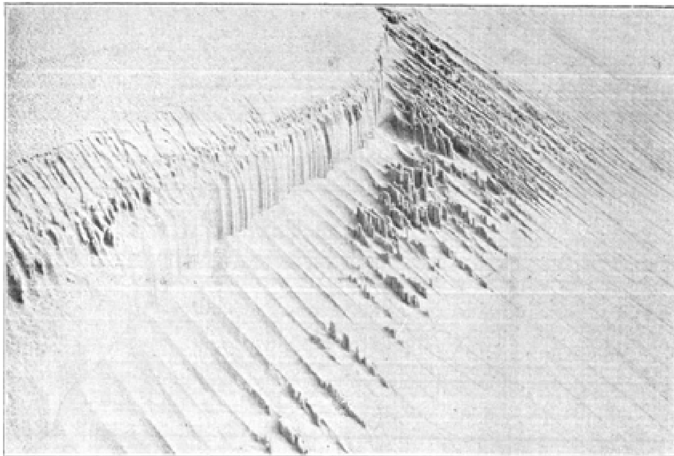
1) F. Exner, Geogr. Annaler, 81, 1927; Forsch. und Fortschr. 52, 1929.
2) Ann. d. Phys. **39**, 637, 1912.



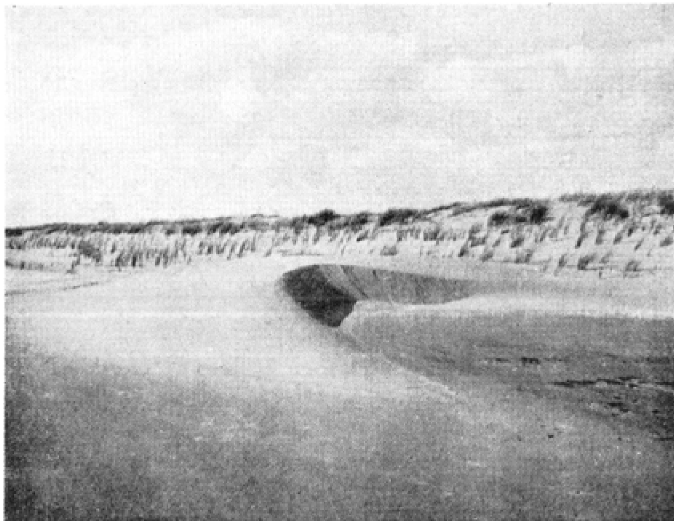
PLAAT XI*a*. Ruitvormige ribbels (§ 124). De pijl geeft de stroomrichting aan. Naar P.D. Timmermans, Proeven over de Invloed van Golven op een Strand, blz. 376.



PLAAT XI*b*. Strandhorens (§ 125). Afstand tussen de toppen: gemiddeld 4,5 m. Naar P.D. Timmermans, Proeven over de Invloed van Golven op een Strand, blz. 356.
Clichés in bruikleen van het Geologisch Instituut et Leiden.



PLAAT XII*a*. Zandgeultjes, in een duinhelling door vallende zandkorrels uitgeslepen (§ 117).
Naar J. van Baren, de Wandelaar, 1, 29, 1929.
Cliché in bruikleen van den uitgever.



PLAAT XII*b*. Sikkelduin (= barchaan) op Terschelling (§ 127).
Naar J.W. van Dieren, Organogene Dünenbildung, fig. III.

snel met de diepte af: in een rivier is de grens wellicht 0,20 m, in een meer 10 m, in de zee 200 m. Ze lopen altijd loodrecht op de richting van de sterkste golfslag.

Bepaal ook hier alle afmetingen zoals bij de asymmetrische ribbels. Deze ribbels zijn steiler, h/λ is ongeveer 1:6. In zeldzame gevallen zijn de golfbergen dubbel of zit er een klein bergje te midden van elk dal. Als het profiel goed symmetrisch is, vindt men dat de ribbels niet van plaats veranderen.

Alles wijst erop dat deze ribbels eigenlijk ontstaan als een soort superpositie van twee asymmetrische ribbelstelsels, doordat de stroom er afwisselend in de ene en in de andere richting overheen spoelt. Bij elke golf kunt u zien hoe stofdeeltjes die in het water zweven heen en weer slingeren; hiervoor is het nodig aandachtig en van dichtbij te kijken! Om de vorming der ribbels te bestuderen wissen we de ribbels uit, en leggen een 3 mm dikke ijzerdraad op de bodem, evenwijdig aan de golfkammen: er vormen zich ribbels die van de draad uitgaan, een voor een, naar beide richtingen. Zelfs een met de vinger getrokken groef kan als uitgangspunt dienen. Als we het oppervlak geheel effen laten, ontstaan er toch na enige tijd ribbels, blijkbaar omdat er altijd plaatselijke hobbeltjes voorkomen, die groeien, zich versterken en aaneensluiten. Zijn de ribbels eenmaal gevormd en verandert de richting der golven, dan is dit zonder invloed en ze behouden hun stand, tot er nog veel sterker golven aankomen die alles wegwissen.

Met de allereenvoudigste middelen kunnen we de vorming der ribbels thuis nabootsen. Doe wat water en een weinig zand in een teil, een aquarium, een waskom, en breng het vat in licht schommelende beweging. De ribbels ontstaan in het midden en lopen dan naar beide richtingen voort, als bij toverslag vormt zich het mooie, regelmatige patroon. Hier en daar zijn er vertakkingspunten, waarvan het ontstaan niet gemakkelijk te begrijpen is (eindtoestand nog niet bereikt?). Aan de rand van de teil lopen alle ribbels loodrecht op de begrenzing, een bewijs dat de stromingen in een vloeistof bij de rand altijd evenwijdig aan die rand gericht zijn (wanneer vertikale stromingen ontbreken). Dikwijls vormen zich eerst ribbels die slechts de halve golflengte hebben en dan spoedig in de definitieve golflengte omslaan. In een dunne zandlaag hebben de zandribbels een kleiner golflengte dan in een dikke; vandaar dat de ribbels aan hun uiteinde dikwijls een weinig gebogen zijn; ze worden daar natuurlijk ook minder hoog.

De golflengte schijnt vrijwel evenredig te zijn met de grootste snelheid die het water bereikt bij zijn heen en weer schommelen

over de ribbels. Als men dus proeven neemt met een waskom en de amplitude der schommeling steeds laat toenemen, neemt tegelijk de maximale snelheid van de waterstroom toe, en dus ook de golflengte der ribbels.

Men is er met veel geduld in geslaagd, terwijl het water heen en weer schommelde, de richting van de vloeistofstromen na te gaan die langs de ribbels spoelen; zo heeft men gevonden dat er achter elk golfbergje een werveltje ontstaat, dat zandkorreltjes de hoogte op haalt (fig. 108). Zodra er een oneffenheid is, vormt zich zulk een werveltje, en samen met de hoofdstroom helpt dit de ribbel van beide kanten ophogen ten koste van de dalen. We begrijpen aldus duidelijk hoe het komt dat een zandoppervlak waarover vloeistof stroomt eigenlijk in labiele toestand verkeert.

Bij de zandribbels aan het strand kan men duidelijk opmerken dat de golfbergen uit fijn zand bestaan, de dalen uit grover korrels; door de voortdurend herhaalde golfslag is deze rangschikking veel volmaakter dan bij de asymmetrische ribbels. Breng een weinig fijne aarde in water waar zich ribbels aan 't vormen zijn: deze deeltjes, nog gemakkelijker zwevend te houden dan zandkorrels, worden weldra boven op de golfbergen verzameld. Niet te verwarren hiermee is het geval van reeds oude ribbels, in wier dalen zich naderhand blaadjes, stukjes hout, enz. hebben vergaard, eenvoudig door de werking der zwaartekracht.

De invloed der korrelgrootte schijnt hier van dubbele aard te zijn. *a*) Bij overigens gelijke omstandigheden neemt de golflengte met de korrelgrootte toe: 4 cm in slijk, 5,5 cm in fijn zand. *b*) Voor een gegeven korrelgrootte ontstaan ribbels alleen als de stroom voldoende sterk is om de korrels te bewegen, maar roch weer niet zo sterk dat hij alles uitwist. Voor gewoon zand is de gunstigste snelheid 20 tot 30 cm/sec; hoe groter de korrels, hoe hoger die optimale snelheid ligt. Voor slijk moet de stroom veel langzamer zijn; heeft de snelheid de gunstigste waarde, dan vindt men ribbels zelfs in het allerdunste en fijnkorreligste slijk, waarvan men allicht had verwacht dat het vanzelf zou vervloeien.[1)]

123. Humusribbels op bospaden.

Deze eigenaardige soort ribbels bemerken we, wanneer we na een hevige regenbui langs een ietwat hellend bospad lopen. Van afstand tot afstand strekt zich dwars over de weg een miniatuur-dam uit, gevormd uit plantenafval en humus; terwijl het

1) Natur und Museum, **29**, 72, 1929.

ribbeltje zelf enkele centimeters breed is, bedragen de tussenruimten meestal verscheidene decimeters; ze zijn zeer ongelijk, maar hebben toch een duidelijke neiging tot periodiciteit. Deze ribbels hebben zich klaarblijkelijk gevormd, toen het water langs het hellende pad stroomde, en zijn dus vergelijkbaar met de ribbels aan de grens tussen zand en stromend water.

124. Ruitvormige ribbels[1)] - (Plaat XI).

Zij ontstaan in vrij zeldzame gevallen bij het terugvloeien der brandingsgolf, wanneer de dunne laag water langzaam terugloopt over een zandlaag van geringe helling. De stromingssnelheid is dan zo klein, dat het water niet voldoende zandkorrels kan vervoeren om zandribbels te vormen. Overal waar er een hobbeltje of een stukje schelp voorkomt ontstaat een stelsel divergerende golven (fig. 85); al die golfstelseltjes zijn natuurlijk evenwijdig, maar verwonderlijkerwijze rangschikken ze zich dikwijls op regelmatige, periodieke wijze.

Twee Japanse waarnemers beweren, dat ze kunnen waarnemen hoe de hobbeltjes ontstaan waaraan de ruitvormige ribbels zich vormen. Als de oplopende golf tot stilstand komt, vormen zich aan alle kanten kleine werveltjes, die wolkjes zand doen opdwarrelen; de waarnemer die van omhoog neerkijkt, kan die rechtstreeks zien. Zodra nu even later die opgewervelde zandwolkjes bezinken, ontstaan er evenveel zandbergjes waartegen de stroming dan breekt. Langs de schuine golvenstelsels wordt het zand verder uitgeknaagd.

125. Strandhorens (Strandspitzen, beach cups).[2)] (Plaat XI).

Af en toe vindt men, ook aan het Nederlandse strand, langgerekte ruggetjes die als tongen loodrecht op de strandlijn uitsteken, en zich rhythmisch herhalen. Zij bestaan soms uit zand van ietwat gewijzigde samenstelling, andere malen uit schelpen en schelpgruis, of uit de buisjes van bepaalde kokerwormen, die soms in grote hoeveelheden voorkomen. De 'golflengte', dus

1) K. Asagoe en A. Imazato, Science Reports Tokyo Bunrika Daigaku, Sect. A, **2**, 89, 1934. - P.D. Timmermans, Proeven over den Invloed van Golven op een Strand, blz. 374. (Diss. Leiden, 1935).
2) D.W. Johnson. Shore Processes and Shoreline Development (New York 1919). - Henning Kauffmann, Rhythmische Phänomene der Erdoberfläche (alleen bruikbaar als feiten- en litteratuurverzameling; de theoretische beschouwingen zijn waardeloos!). - P.D. Timmermans, Proeven over den Invloed van Golven op een Strand. Diss. Leiden, 1935. - B.G. Escher, Leidsche Geol. Mededelingen, **9**, 79, 1937.

de afstand tussen twee opeenvolgende ruggetjes, is voor elke groep strandhorens weer anders, hij kan van 0,30 m tot 30 m bedragen. Ook binnen één bepaalde groep, onder gelijksoortige omstandigheden gevormd, zijn variaties van zelfs 50% niet zeldzaam. De hoogte van de ruggetjes boven het strand bedraagt zelden meer dan 15 cm. Het schijnt zeker, dat een rustige zee, waarvan de golfkammen evenwijdig aan de kustlijn zijn en

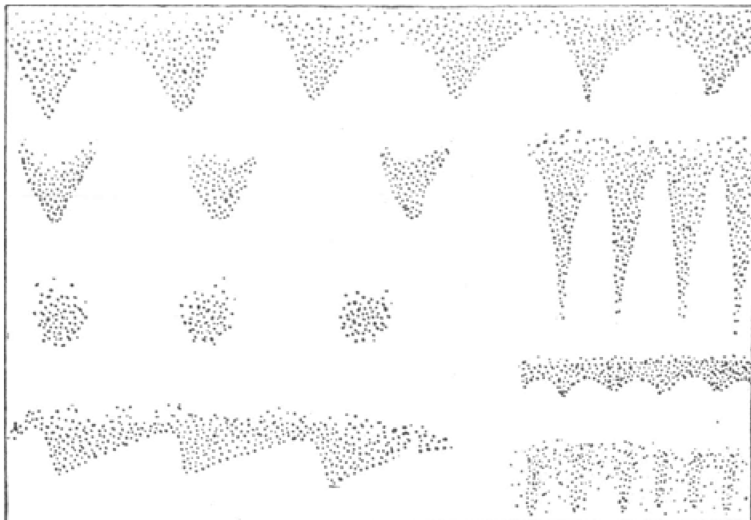


Fig. 109. Verschillende vormen van strandhorens. De zee is onderaan te denken, het zandstrand bovenaan (naar Johnson, Shore Processes, blz. 465).

loodrecht tegen de kust aanlopen, gunstig is voor de vorming; de deining is gunstiger dan de zeeën. Bij voorkeur neme men bij aflopend water waar. Stellig zal het verschijnsel der strandhorens veel vaker blijken voor te komen dan tot hiertoe bekend is, wanneer men er maar enige aandacht aan besteden wil.

De strandhorens die uit zand bestaan vormen zich door de zuigende werking van de teruglopende brandingsgolven. Waar een toevallige kleine uitholling in het strand aanwezig is, heeft het terugstromende water groter diepte en ondervindt het minder weerstand; het schuurt dus het strand sterker uit, de uitholling wordt versterkt. De grotere dalen overwinnen de groei van de naburige kleinere, tot een soort evenwichtstoestand bereikt is waarbij alle uithollingen ongeveer even breed zijn.

Bij de strandhorens die uit schelpen of buisjes bestaan, dus uit aangespoeld materiaal, speelt waarschijnlijk ook het oplopen der golven een rol. Waar de waterlaag het dikst is, worden de schelpen en de buisjes gemakkelijker opgestuwd en opzij geduwd, dan in de ondiepe waterlaag van de ruggen. Hier zal dus weer een toevallig aanwezige oneffenheid versterkt worden: een effen strand bevindt zich eigenlijk in labiele toestand.

126. Ribbels van zand en lucht.[1)]

Ook deze kan men aan het strand aantreffen, maar daarnaast ook in de duinen, in de Veluwe, in de zandstuivingen bij Soest en bij Drunen. Het eerste wat den waarnemer opvalt is weer, dat de ribbels overal loodrecht op de windrichting staan, zodat het geribbelde oppervlak wel op een kaart van de luchtstromen gelijkt. Let op de punten waar een luchtstroom zich om een hindernis splitst: daar buigen de ribbels meer en meer, en sluiten aan bij de zandtong die de wind achter zulk een hindernis gevormd heeft. Op plaatsen waar enige zandhopen zich een meter of twee boven de vlakte verheffen, is de ribbelrichting zeer ingewikkeld en geeft merkwaardige aanwijzingen over de windwervelingen. Teken een plattegrond van zandribbels en luchtstromen!

Er is nog maar weinig gemeten aan zandribbels in de vrije natuur. Men heeft golflengten gevonden van 1 cm tot 200 cm.

Typische voorbeelden:

korrelgrootte	**golflengte**	**hoogte**
0,2 mm	8-10 cm	1,0 cm
1 mm	25-30 cm	2,5-4,0 cm
2-3 mm	60-120 cm	7,0-10,0 cm

Doe zelf dergelijke metingen! (Vgl. blz. 209).

Deze zandribbels hebben een typisch asymmetrisch profiel: zacht glooiend aan de windzijde, steil aan de lijzijde. De kammen bestaan uit grover materiaal dan de dalen, aan het strand dikwijls uit stukjes van schelpen, die hun een oranje kleur geven; de fijnere, rondere korrels zijn allemaal door de wind naar de rustiger dalen vervoerd, en kleuren die bleekgeel.

De meeste mensen weten niet dat de zandribbels zich voort-

1) J. Trikalinos, Peterm. Mitt. **74**, 266, 1928. - Exner, Ergebn. d. Kosm. Physik, 1, 373, 1932.

durend vooruitbewegen, en wel met de wind mee. Toch is dit iets wat men met de allereenvoudigste hulpmiddelen kan onderzoeken: een paar stokjes dienen om aan te geven waar een ribbel zich op dit ogenblik bevindt; ze worden aan beide uiteinden van de ribbel geplaatst, om de windstroming niet te storen; verder gebruiken we een horloge en een duimstok. De beweging der zandkorrels geschiedt vooral gedurende de plotselinge windvlagen. Voorbeelden van de orde van grootte:

korrelgrootte	golflengte	snelheid
0,15 mm	13 cm	114 cm/uur
?	7 ,,	6 ,,
?	10 ,,	60 ,,
?	22 ,,	70 ,,

Als toevallig de kam van de ribbel op één plaats hoger is dan op de andere, heeft de wind meer tijd nodig om het zand daar weg te blazen en blijft dat gedeelte van de kam achter. Zo ontstaan dikwijls zigzagvormen; aan de grenzen van het met ribbels bedekte veld zijn de golfkammen meestal lager, bewegen dus sneller, en zijn van de wind af gekeerd: *de omgebogen punt gaat vooruit*. Deze merkwaardige zandvorm zullen we weldra terugvinden bij de beroemde sikkelduinen (§ 127).

Trikalinos, die met een handanemometertje nauwkeurige bepalingen van de windsnelheid deed, vond dat een wind van 4,0 m/sec nog na een dag geen ribbelvorming veroorzaakte; terwijl een wind van 4,50 m/sec reeds duidelijke veranderingen teweegbracht.

Volgens Sokolow worden korrels van 0,25 mm diameter bewogen door wind van 4,5 tot 6,7 m/sec. In 't algemeen wordt de vereiste snelheid *u* ongeveer gegeven door de vergelijking van Jeffreys:

$$u^2 = 6\frac{\rho - \rho'}{\rho'} gd$$

, die we al in § 121 leerden kennen. Het soortelijk gewicht ρ van zand is weer 2,5. Het soortelijk gewicht ρ' der stromende vloeistof was 1 bij de ribbels van zand en water, maar wordt 0,0013 voor ribbels van zand en lucht. Met deze waarden wordt $u = 3400\sqrt{d}$. De snelheid die de wind moet hebben om ribbels te vormen is dus bijna 40 maal zo groot als de snelheid die een waterstroom hiervoor moet hebben.

Het eerste wat gebeurt is het meevoeren der fijnste korrels, zodat het oppervlak ongelijk wordt: overal waar er veel fijne

korrels bijeen lagen is er een kuiltje ontstaan. Er vormen zich korte en lange strookjes van grove korrels die stand houden en boven de rest blijven uitsteken, en aan de lijzijde waarvan het fijnste zand neervalt. Onmiddellijk vormen zich in de valleien luchtwerveltjes, die maken dat de lijzijde steil afvalt terwijl de loefzijde veel zachter oploopt. Aan de uiteinden buigen de kammen sikkelvormig om; hier en daar worden ze doorbroken door een strook waar de wind alles evenwijdig aan zijn richting gladveegt.

Bij een windsterkte van 6 m/sec ontwikkelen zich de ribbels het mooist. Bij 'het begin' van een open zandoppervlak (de kant van waar de wind aankomt) hadden ze een golflengte van 3 tot 5 cm, met valleien van 4 tot 6 mm diepte; ze bestonden vooral uit grove korrels. In het middengedeelte van het zandoppervlak waren de valleien 8 tot 10 mm diep; ze bestonden uit gemiddeld grove korrels. Aan het einde kwamen golflengten tot 14 cm voor, de valleien waren weer iets minder diep, de korrels fijner (vgl. § 92).

Bij een gemiddelde windsterkte van meer dan 7 of 8 m/sec wordt alles door de wind weggeveegd, en vindt men de ribbels alleen hier en daar, achter een struik of op beschutte plaatsen waar de windsnelheid getemperd is.

Men ziet *dat het verschil in korrelgrootte essentiëel is voor het ontstaan van de zandribbels*. Daardoor wordt het front van gelijkmatige weerstand tegen de wind plaatselijk doorbroken, en ontstaan de eerste toevallige ongelijkmatigheden, die door de werking der wervels in een periodieke struktuur overgaan. Tracht men de zandribbels op te vatten als golven aan de grens van twee verschillend snel bewegende lagen en past men de formule van Helmholtz toe voor de golflengte der ribbels[1], dan zou men vinden:

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \frac{v^2}{\frac{\rho}{\rho'} - 1} = \frac{2\pi}{981} \frac{v^2}{\frac{2}{0{,}0013} - 1} = (0{,}002v)^2.$$

De ribbels van zand en lucht zijn blijkbaar geen golven van Helmholtz, evenmin als de ribbels van zand en water; want voor v = 6 m/sec wordt λ = 1,4 cm; veel te weinig! - Exner heeft een andere theorie ontwikkeld, onderstellende dat de wind door wrijving tegen de grond wervels maakt, die als rollen over elkaar glijden en de ribbels uitgraven.[2]

1) Vgl. Exner, Ann. Hydr. **47**, 155, 1919.
2) Sitzungsber. Ak. Wien, **129**, 929, 1920; **137**, 705, 1928.

Het is belangwekkend, het zandtransport bij sterke wind te meten. We voorzien ons van een zakje, gemaakt van gaas met heel fijne mazen, waar de lucht nogal vrij doorheen spoelt maar de zandkorrels door tegengehouden worden. Hoe dichter het zakje boven het stuivende strand of de duinen gehouden wordt, hoe meer zand wij er per minuut in opvangen. Het valt niet moeilijk, uit dergelijke bepalingen af te leiden hoeveel zand er per m^3 in de lucht zweefde; daartoe zijn ruwe schattingen van de windsnelheid wel voldoende. Exner vond op 20 cm hoogte zelfs bij felle wind slechts enkele gram zand per m^3 lucht.

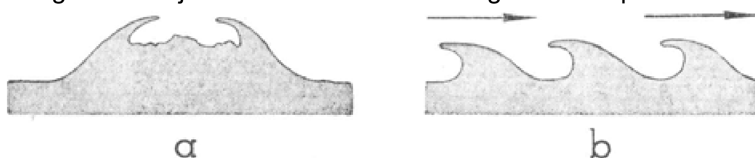


Fig. 110. Vervormingen van zandribbels. *a*) Na lichte vorst en wind; de middengedeelten zijn weggeblazen. *b*) Vochtige ribbels waartegen de wind fijn droog zand heeft geblazen.

Merkwaardig gehavend worden de zandribbels soms bij lichte vorst. Blijkbaar waren de kammetjes door de regen met water gedrenkt; de bovenste delen drogen het eerst op; vriest het nu, dan vormen de zijdelingse en onderste delen een harde korst, terwijl de wind het zand er tussenin wegblaast (fig. 110*a*).

Vochtige zandribbels, over dewelke de wind fijn droog zand blaast, groeien *tegen de wind* in en worden geheel asymmetrisch: het droge zand plakt aan het vochtige en vormt overhangende ribben[1)] (fig. 110*b*).

127. Sikkelduinen of barchanen.[2)]

Als er maar weinig zand is, dat door de wind over een hardere ondergrond voortgejaagd wordt, ontstaan er ‘vrije duinen’, waarvan de merkwaardigste de *sikkelduinen* of ‘barchanen’ zijn (‘loper’ of ‘blinkert’; vgl. plaat XII). Deze vormingen, zo kenmerkend voor bepaalde woestijnlandschappen, worden soms ook aangetroffen op de zandplaten onzer Noordzee-eilanden[3)].

1) Natur und Museum, **66**, 288, 1936.
2) J.W. van Dieren: Organogene Dünenbildung. (Diss. Amsterdam 1934).
3) Een voorbeeld van beschrijving voor onze streken bij O. Baschin, Zs. Ges. Erdk. 422, 1903. Zie ook Van Dieren, t.a.pl.

Het zijn zandhopen, die de bolle zijde naar de wind keren, en langzaam met de wind mee als logge monsters voortkruipen, de puntige uiteinden vooruit (fig. 111). Een snelheid van de orde van 15 cm/uur werd gemeten aan sikkelduinen van 0,22 m tot 1 m hoogte. Deze snelheid ligt tussen de snelheid der ribbels en die van de eigenlijke duinen in; ze neemt iets af naarmate men grotere sikkelduinen onderzoekt. Evenals bij de zandribbels ontstaat de boogvorm doordat er minder zand is aan de uiteinden, en de wind daar gemakkelijker spel heeft. Maar volledig is deze

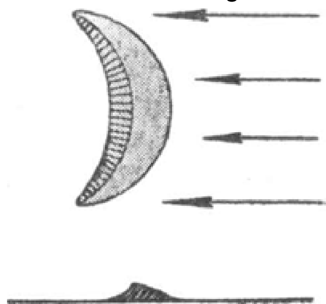


Fig. 111. Schema van een barchaan of sikkelduin.

verklaring zeker niet, want de kromming neemt geenszins voortdurend toe, zoals men dan zou verwachten. In werkelijkheid behoudt het sikkelduin slechts zijn vorm door een ingewikkeld spel van windstromen. Telkens worden de zandkorrels door de wind van de voorkant weggeblazen en naar de top vervoerd, vanwaar ze dan naar beneden gijden; zo komt het dat het gehele sikkelduin schuin gelaagd is, wat men duidelijk kan zien als men er een doorsnede van maakt met een spade. Men beweert dat het voldoende is een hoopje stenen over de zandrug uit te spreiden om dit evenwicht van afbraak en opbouw te verstoren en het sikkelduin te vernielen: de wind blaast het dan langzaam uit elkaar.

In de felle winter van 1942, op 26 Januari, bij - 15° C en een ijzige, droge noordenwind, kon men over de met poedersneeuw bedekte weilanden tussen Abcoude en Amsterdan de vorming van *sneeuwbarchanen* waarnemen. Het was een groots gezicht. Onafzienbare rijen sneeuwhopen zag men in gesloten gelederen oprukken, terwijl de sneeuw van de toppen wegstoof in de wind. Men kreeg de indruk dat zich eerst lange fronten hadden gevormd, die daarna tot sikkelduinen uiteengevallen waren; elke sneeuwhoop had een middellijn van een paar meter en had de typische barchaanvorm.

Wie sikkelduinen vindt beproeve eens hun levensgeschiedenis te volgen. Let ook op hoe ze veranderen als de wind keert!

128. Duinen.

De grote, meer algemeen bekende duinen zijn altijd *organogene duinen*, die om planten of struiken zijn ontstaan. Hun grotere afmetingen zijn alleen het gevolg van hun bestendigheid, en

deze is weer alleen te begrijpen door de tussenkomst van de plantengroei waaromheen ze gevormd zijn. Dit is het fundamentele onderscheid tussen ribbels en sikkelduinen enerzijds, ‘echte’ duinen anderzijds, het onderscheid waardoor een sikkelduin nooit tot een echt duin zal worden, hoe lang de wind ook waait. Zo komt het dat ribbels en sikkelduinen bepaald zijn door de ogenblikkelijke windtoestand, de duinen echter door de gemiddelde toestand over langere tijd.

Het duin vormt zich, doordat bv. een groep grassen door het zand bedolven wordt (§ 120); de halmen verlengen zich en groeien uit, tot ze weer aan de oppervlakte komen; de wind zet opnieuw zand af, de plant schiet verder door, enz. Hoe hoger het duin, hoe meer het door de regen zijn zoutgehalte verliest, en hoe meer verschillende planten er op kunnen groeien, die het zand tenslotte geheel vastleggen.

Men kan de organogene duinen naar hun vormen indelen, op zulke wijze dat daardoor tevens de ontwikkelingsgeschiedenis dezer vormingen wordt weergegeven.[1)]

A. Offensieve hindernisduinen.

1. Primaire duinen: op de hoogste zoom van het strand groeien hier en daar groepjes planten, waartussen zand neervalt; eerst zijn dit éénjarige planten zoals het zeeraket (Cakile), later overblijvende grassen (Triticum junceum, Elymus, Ammophila). De planten en de zandhoop groeien tegelijk; er vormen zich min of meer schildvormige duintjes.
2. Secundaire duinen (‘zeeloper’, ‘strandloper’, ‘zeereep’): de primaire duinen versmelten tot een keten, loodrecht op de heersende wind; zij worden aanzienlijk groter en asymmetrisch. Dit zijn de ‘typische’ duinen.

B. Offensieve verplaatsingsduinen.

3. Windkuilduinen: de wind holt het duin uit, aan de loefzijde van de top, en vervoert het zand naar de lijzijde; soms vormt zich een klein duintje te midden van de kuil.
4. Ringduinen: de uitholling is zover doorgegaan, dat de kuil het peil van het grondwater heeft bereikt; men ziet nu alleen een ring van zand.
5. Hoefijzerduinen, paraboolduinen: een deel van de ring wordt weggeblazen, het duin begint te lijken op een barchaan, kan in beweging komen en het duingebied verlaten.

1) Vereenvoudigd naar J.W. van Dieren, t.a.p.

6. Aktief duinklif: als het duin aan de zee grenst, wordt het bij hoog water afgeknaagd, stort in. Er vormt zich een steile wand zonder plantengroei. Zand waait over het duin en valt aan de lijzijde neer; de kust wijkt terug.

C. Afgebroken duinen.

7. Passief duinklif: wordt ook door de zee afgeknaagd, stort in, vormt een onbegroeide wand. Er waait geen zand over het duin; dit wijkt niet terug, maar wordt langzamerhand lager.
8. Polle: te midden van een uitgewaaid gebied blijft hier en daar een weerstandskrachtiger gedeelte staan, steil als een tafelberg opstekend.

De onbegroeide zandduinen alleen hebben de echte kenmerkende wilde natuurvormen, asymmetrisch op dezelfde wijze als de ribbels; aan de windzijde bedraagt de helling tot 12°, soms 17°; aan de

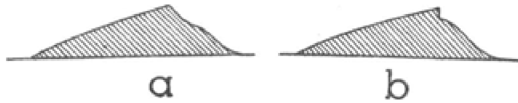


Fig. 112. Doorsnede van zandduinen. *a*) Normaal profiel. *b*) Afgebrokkeld profiel.

lijzijde valt het profiel af onder 30°, de natuurlijke hellingshoek van zand; is de helling begroeid, dan kan het 40° worden. Ook hier is de verklaring der asymmetrie, dat het zand door de wind over de helling geblazen wordt tot het de top bereikt, en het door zijn gewicht aan de achterkant naar beneden rolt. Bij stormweer is het een prachtig gezicht om van op enige afstand het voortgejaagde zand over de kam van het duin te zien stuiven. Zo begrijpt men ook, dat aan de windzijde de helling effen en glad is, aan de achterzijde onregelmatiger. Bij nauwkeuriger toekijken vindt men geregeld dat aan de top een stuk afgebrokkeld is (*b*); slechts bij het vooruitschuiven herstelt zich het normale profiel (*a*) (fig. 112). Duidelijk is nu ook dat de duinen inwendig op dezelfde manier laagsgewijs gebouwd moeten zijn als we 't reeds bij de sikkelduinen hebben opgemerkt (fig. 112). Giet men een glas water voorzichtig op het duin uit, en maakt men daarna een doorsnede van het terrein, dan ziet men hoe bepaalde lagen beter bevochtigd zijn dan andere, en hoe de inwendige struktuur zich openbaart.[1)]

De voortplantingssnelheid der duinen is enkele meters per jaar, des te langzamer naarmate zij groter zijn (vgl. ribbels en

1) Nat. **142**, 403, 1938.

sikkelduinen!) Aan de windzijde zijn de duinen ‘gepantserd’ door donkergeel grofkorrelig zand, waarin de voet slechts een paar cm inzinkt. Aan de lijzijde is het zand heldergeel, fijnkorreliger, en zo los dat wij er diep inzinken. De wind sorteert blijkbaar het zand, en wel op een dergelijke wijze als we bij de ribbels van lucht en zand hebben opgemerkt (§ 126). Neem fijn kopergaas, vorm het tot een bakje, en werp er 500 gram duinzand in; hoeveel procent gaat erdoor als het zand afkomstig is van de Westzijde van het duin, hoeveel als het van de Oostzijde komt?

129. Sneeuwribbels.[1)]

In het algemeen wordt over een vlakte de sneeuw in grote onregelmatige golvingen voortgejaagd door de wind. Voortdurend beweegt het sneeuwdek, de golven glijden langzaam vooruit en vervormen zich. Druk een kinderemmertje in de sneeuw en steek aldus een sneeuwcylinder uit; langzaam vult zich de aldus ontstane opening opnieuw met sneeuw.

Eigenlijke sneeuwribbels kunnen op de volgende wijze ontstaan.

a. In enkele zeldzame gevallen valt de sneeuw in evenwijdige ribbels, die men vooral op een asfaltweg mooi ziet: dit zou een echte ‘afdruk’ zijn van een diskontinuïteitsoppervlak volgens Helmholtz. Ze zijn asymmetrisch en keren *de steile zijde naar de wind* (dus het omgekeerde van de zandribbels!). Gemeten werd bv. $\lambda = 2{,}5$ cm, $h = 1$ cm. Ze verplaatsen zich met de wind mee, maar gedurende ogenblikken van windstilte schieten ze ineens weer tegen de wind in vooruit.

b. Beneden - 18° plakt de sneeuw niet meer, hij stuift als zand; ribbels ontstaan daarin slechts, wanneer een gedeelte van de sneeuw korrelig geworden is, zodat grovere en fijnere deeltjes naast elkaar voorkomen (vgl. § 126). Deze sneeuwribbels keren evenals zandribbels *de steile zijde van de wind af*. Uit de aard der zaak zullen ze in ons klimaat wel zeer zelden voorkomen. Het bestaan van deze ribbelvormen en van de hoger beschreven sneeuwbarchanen bewijst dat bij zulke lage temperaturen de sneeuw bijna geheel dezelfde vormen vertoont als het zand.

c. Een derde soort sneeuwribbels ontstaat als de wind de sneeuwlaag afknaagt. Ze hebben *de steile zijde naar de wind toe* gekeerd. Deze ‘erosieribbels’ kunnen op verwarrende wijze

1) Vaughan Cornish, Geogr. Journ. 1902. - Waves of Sand and Snow.

met de oorspronkelijk gevormde ribbels gecombineerd voorkomen.

d. Tenslotte zijn er meer onregelmatige strepingen, die men soms ziet verschijnen als de sneeuwlaag begint te smelten, hetzij in de zon, hetzij door de regen[1]. Op hellingen zijn ze gericht volgens de lijnen van de grootste schuinte; op vlakke grond in allerlei richtingen, dikwijls loodrecht op de dooiwind.

Men ziet hoe ingewikkeld en verscheiden de vormingswijze van sneeuwribbels kan zijn, en hoe gevaarlijk het zou wezen de verschillende vormen als één verschijnsel te bespreken.

130. Golvingen veroorzaakt door sleden over sneeuw.[2]

In landen met veel sledeverkeer heeft men opgemerkt dat de sledeweg 'vanzelf' golvingen gaat vertonen. In Frans Canada noemt men ze 'cahots (denk aan 'cahoter'!) Hun profiel is *symmetrisch*, de golflengte hangt af van de gebruikelijke lengte der sleden.

Om het verschijnsel na te bootsen trekken we een mandje aan een touw over het droge strand met een snelheid van bijvoorbeeld 4 km/uur: het spoor in het zand blijft vlak. Nu nemen we een vrij zwaar strijkijzer en trekken dit over zand dat ietwat vochtig is: het zinkt periodiek dieper of minder diep in het zand, de golven die zich vormen zijn merkwaardigerwijs symmetrisch zoals die der sleden; de golflengte is ongeveer 3 maal zo lang als het strijkijzer. Blijkbaar is de 'kleverigheid' van het wegdek een essentiële voorwaarde; het ontstaan der golvingen is analoog met het verschijnsel van de strijkstok die de snaren aan het trillen brengt door ze telkens even mee te nemen en dan los te laten: het is een soort 'relaxatietrilling'.

Worden ook glijbanen, waarop door de vrolijke schooljeugd veel gegleden wordt, niet tenslotte hobbelig?

131. Golvingen in verkeerswegen.

Iedere verkeersweg is eigenlijk in labiele toestand. Als men maar lang genoeg wacht, komen er onherroepelijk oneffenheden in; en iedere oneffenheid wordt versterkt, breidt zich golvend uit, tot de weg in een reeks hobbels is veranderd. Alleen doordat het zo langzaam gaat is het mogelijk om enige tijd een weg in bruikbare toestand te houden. De golvingen vormen zich even-

1) Peterm. geogr. Mitt. **51**, 237, 1905. - Nat. **109**, 374, 1922.
2) Vaughan Cornish, Waves of sand and snow.

goed op een grintweg als op een asfaltweg, maar in 't laatste geval nog veel langzamer.

De grintweg op de Lekweg van Vreeswijk naar Culemborg was in 1935 met golvingen bedekt over een afstand van vele kilometers. Nadat het geregend had, stond er water in al de miniatuurdalen, men zag ze van verre al de heldere lucht weerspiegelen. De golflengte was ongeveer 40 cm, de hoogte van de toppen boven de dalen bedroeg wel 5 tot 10 cm.

In Amerika heeft men het onstaan der ribbels experimenteel gevolgd, door over een grintweg een touw te spannen van 18 mm dikte. Naarmate automobielen over de weg reden, en op dit punt een kleine schok kregen, ontwikkelde zich daarvan uitgaande een stelsel golven in de verkeersrichting.[1)]

132. Spoorribbels.[2)]

Aan treinsporen merkt men het voorkomen van ribbels door het plotseling toenemen van het geratel. Ook zijn ze te zien bij tramrails, vooral bij maneschijn of lampverlichting; waar ze voorkomen maakt het tramrijtuig een lelijk ratelend geluid. Hun golflengte bedraagt enkele centimeters; hun diepte, breukdelen van een millimeter. Meestal zijn ze meer aan de zijkanten dan boven op de rail zichtbaar. Ze komen dikwijls voor op plaatsen waar de tram remt, of een bocht maakt, zodat de wielen niet alleen meer rollen maar ook *wrijven* tegen de sporen. De snelheid van het rijtuig moet 15 tot 25 km/uur bedragen.

Deze spoorribbels zijn een echte nachtmerrie voor de ingenieurs, omdat hun oorzaak nog zo weinig bekend is. Waarschijnlijk speelt de wrijving hier de hoofdrol, op dezelfde wijze als bij de verkeersribbels of bij golven die de slede in de sneeuw maakt. Een kleine indeuking wordt door het verkeer dieper gemaakt; het effen oppervlak is een labiele toestand. Vandaar dat het voldoende is een stukje rail dat ribbels vertoont te midden van een effen baanvak over te brengen, om de ‘gezonde’ sporen te ‘besmetten’ en ribbelvormig zich over het geheel te zien uitbreiden.

Veel zeldzamer zijn golven in de rails met een golflengte van 40 tot 90 cm. Ook kent men gevallen waarin bijvoorbeeld om de 4 m nu eens de rechter, dan de linker rail afgesleten is, hetgeen wijst op zigzagbeweging van het tramrijtuig.

1) Science, blz. 395, 1928. - De Amerikanen spreken van washboard-effect of Corduroy-effect.
2) Hennig Kaufmann: Rhytmische Phänomene. Met uitvoerige litteratuuropgave.

133. Golven over korenakkers en wouden.[1)]

Als de wind over een korenveld strijkt, ziet men golven erover lopen. Het mooist is het verschijnsel bij harde wind, en als men een wijd uitzicht heeft. De lucht boven het korenveld heeft een zekere snelheid, terwijl de lucht tussen de halmen weinig of niet beweegt; er is hier dus weer een diskontinuïteitsoppervlak, dat zich volgens Helmholtz in plooien zal rimpelen. De korenhalmen dienen tevens als aanwijzers voor het voorbijtrekken van deze golven.

Hetzelfde verschijnsel kan men waarnemen als de wind langs een muur strijkt die met klimop begroeid is. Of langs een net. Of op grote schaal, als men van op een heuveltop over de wouden kijkt, en grote windgolven over de boomkruinen ziet lopen; van uit een vliegtuig zijn ze in hun statig voorbijtrekken nog beter te volgen.

134. Vervorming van het wegdek door het verkeer (fig. 113).

Zeer opvallend is de afschuiving, die op sommige grote wegen ontstaan is tengevolge van het verkeer. Men kan die precies meten door de vervorming welke de oorspronkelijk regelmatige klinkerrijen zijn gaan vertonen: ze zijn S-vormig doorgebogen,

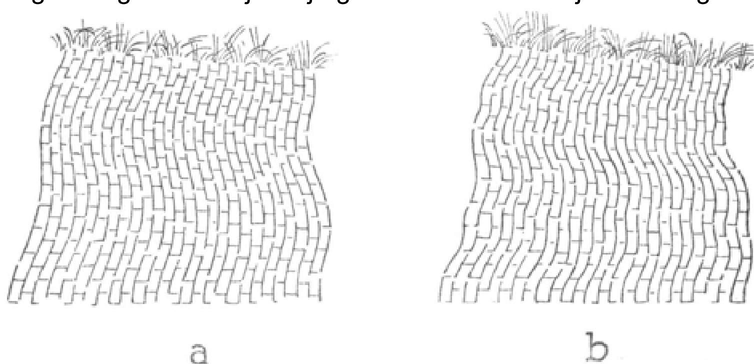


Fig. 113. Vervormingen in het wegdek door het verkeer.

op elke helft van de weg dus als 't ware een eind weggedrukt in de richting waarin zich aan die zijde het verkeer beweegt (fig. 113*a*). Op de weg van Markelo naar Goor bedraagt de amplitude dezer slingerlijn tot 60 cm!

1) O. Baschin, Peterm. Mitt. **64**, 50, 1918. - Naturwiss. **6**. 355, 1918.

In andere gevallen vindt men aan elke zijde van de middenstreep zelfs een *dubbele* slingerlijn (fig. 113*b*): die komt klaarblijkelijk overeen met de sporen van de rechter- en van de linkerwielen der voertuigen, voor elke helft van de verkeersweg.

Uit dergelijke waarnemingen ziet men eens te meer, hoe poedervormig materiaal in allerlei opzichten te vergelijken is met een viskeuze vloeistof.

135. De natuurkunde van het skilopen.[1)]

Zelfs in ons gematigd klimaat komt het een enkele keer voor dat de skilopers zich kunnen verheugen in zware sneeuwval, en dat de lange latten te voorschijn gehaald kunnen worden. Het is voor dit geval dat ik u zou willen voorstellen, enige aandacht te besteden aan de ingewikkelde vervormingen die de

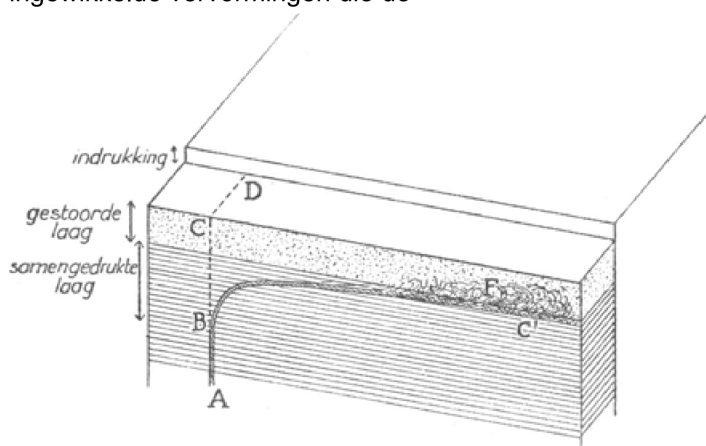


Fig. 114. De vorming van een ski-spoor in de sneeuw (overlangse doorsnede).

sneeuwlaag bij het ski-en ondergaat en aan de wijze waarop zij 'vloeit'.

Vooreerst onderzoeken we hoe eigenlijk het spoor gevormd wordt. De ski glijdt klaarblijkelijk iets lager dan het algemene sneeuwoppervlak, hij drukt de sneeuw samen, terwijl tegelijk losse sneeuw naar beide kanten wegstuift. We nemen een glazen plaat en drukken die vertikaal in een hellende sneeuwlaag, zo

1) Nakaya, Tada, Setido, Takano, Journ. Fac. Sc. Hokkaido, Ser. II, 1, 265, 1936.

diep mogelijk, loodrecht op de richting van de steilste helling; we halen de plaat weer op, en vullen de groef DCA die zich gevormd heeft met roetzwart. Vraag een ski-er de helling af te glijden, dwars over de groef; en laten we daarna voorzichtig met mes en schop een overlangse doorsnede midden langs het spoor maken. Het resultaat is schematisch voorgesteld in fig. 114. De roetlaag, die eerst volgens de lijn ABC verliep, is nu omgebogen tot de kurve ABC', die zich over een afstand van *verscheiden meters* uitstrekt. We zien dus dat de sneeuw aan de oppervlakte vooruitgestuwd is door de ski, en dat door die afschuiving de diepere lagen vervormd zijn op de wijze van een taaie massa. Daarentegen is het roet nabij F met de sneeuw vermengd; in dit gebied heeft de sneeuw zich gedragen als een *wervelende* vloeistof met weinig taaiheid.

Deze waarnemingen geven een eerste inzicht in de merkwaardig ingewikkelde mechanica der poedervormige lichamen.

136. Gasontwikkeling onder wegdek en sneeuwdek.[1)]

Bij bepaalde asfaltwegen bemerkt men 's zomers eigenaardige opwelvingen, hier en daar een gaatje vertonend of een barst. Het zijn plaatsen waar zich gas heeft gevormd, dat door de hitte een hogere druk heeft gekregen, en nu de zacht geworden asfaltbedekking heeft kunnen oplichten en doorboren.

Iets dergelijks komt ook een enkele maal voor bij een bevroren sneeuwlaag. Het gas verzamelt zich op bepaalde punten, en doet de sneeuwkorst openspringen in stervormige barsten.

137. Krimpscheuren.[2)]

a. Waar modderige grond uitdroogt en barst, zien we soms een merkwaardige struktuur van min of meer zeskante veelhoeken. Of ze groot of klein zijn hangt volgens sommigen af van de uitdrogingssnelheid[3)], volgens anderen van de dikte der modderlaag. In elke veelhoek is het midden iets lager, terwijl de randen omkrullen.

b. Niet hiermee te verwarren zijn de veelhoeken die door de werking van de vorst ontstaan! De onderste lagen blijven bevroren terwijl de bovenste ontdooien, samentrekken en daarbij barsten; de spleten, die verscheiden centimeters diep kunnen

1) Met. Zs. **55**, 306, 1938.
2) H. Kauffmann: Rhytmische Phänomene.
3) Terada, Sc. Papers Phys. Chem. Res. Tokyo, **16**, 164, 1931.

zijn, sluiten zich weer als het begint te vriezen. Het veelhoekenpatroon is regelmatiger dan in het geval van uitdroging. Daarenboven is hier het centrum van elke veelhoek hoger dan de randen.

c. Een derde wijze waarop krimpscheuren kunnen ontstaan, zien we aan de blokken bazalt waarmee onze zeeweringen tegen het geweld der golven bedekt zijn. Deze verrassend regelmatige zeskante blokken, afkomstig uit het Zevengebergte, zijn door de natuur zelf gevormd: toen het gloeiende gesteente afkoelde heeft het zich samengetrokken, en zijn er zeshoekige krimpscheuren ontstaan.

Het zeskant patroon, dat in al deze gevallen klaarblijkelijk met een zekere voorliefde optreedt, heeft de eigenschap, met het kleinste aantal scheuren de spanning zo volledig mogelijk op te heffen.

138. Het stof.[1)]

De stofjes die in onze dampkring zweven spelen een belangrijke rol in veel meteorologische en hygiënische vraagstukken. Om iets te weten te komen over de samenstelling van deze bevolking die onze dampkring bewoont, is het vooreerst nodig dit stof te kunnen verzamelen.

1. Men vangt sneeuw op zuivere schotels op, laat haar smelten, en onderzoek het stof dat bezinkt; men kan ook filtreren of uitdampen.
2. Men verzamelt het stof dat op daken, kerken, standbeelden ligt.
3. Men vangt stof op met behulp van platen of borden die met glycerine ingesmeerd zijn, vooral wanneer zich de geelgrauwe nevel vormt die kenmerkend is voor een stofregen.

Het onderzoek van deze stofdeeltjes onder het mikroskoop leert dat ze bevatten: roet; kolloidale stoffen; diatomeeën (mikroskopische wieren); stuifmeel; sporen (van schimmels?); fijn verdeeld anorganisch stof ($CaCO_3$, $CaSO_4$). Zeer merkwaardig waardig zijn sommige stofkorrels, die er onder 't mikroskoop uitzien als bijna zuivere bolletjes van 0,1 mm tot 0,2 mm diameter, en die uit metallisch ijzer bestaan. Men haalt ze uit het verzamelde stof met behulp van een magneet, waarvan men de polen omringt met een dun papiertje, om het magnetische stof gemakkelijk van de magneet te kunnen losmaken. In een druppel kopersulfaat-oplossing bedekken zich die bolletjes

1) Vgl. bv. M.W.R. **52**, 133, 1924. - Science, **75**, 216, 1932. - Comité nat. français d'Astronomie, Congrès 1932, blz. 175.

onmiddellijk met een rood koperhuidje. Men vermoedt dat dit overblijfsels zijn van ‘vallende sterren’! Vele meteorieten zijn immers uit ijzer samengesteld, en voor de veel kleinere vallende sterren zou hetzelfde kunnen gelden; de ronde vorm wijst op een vorming in gesmolten toestand. Een andere vorm is zeer onregelmatig (diameter 0,5 mm), en herinnert levendig aan een hoopje half gesmolten sneeuw[1]. In elk geval zijn zulke stofjes niet te vinden in vulkanische as; daarentegen is verwarring mogelijk met verbrandingsprodukten onzer haarden. Maar het feit dat die magnetische stofjes in de meest afgelegen streken van de aardbol gevonden zijn, zekere verschillen in scheikundige samenstelling, en het af en toe op een zeer rustige nacht voorkomen van een ‘stofval’, bijna geheel uit magnetisch stof bestaande, pleiten wel voor de kosmische oorsprong. In dezelfde richting wijst, dat stofvallen bijzonder veel voorkomen in de maanden November en December, waarin er veel vallende sterren zijn (§ 180).

Beproef dergelijk stof op te vangen tijdens een sterrenregen of in de daaropvolgende uren!

139. Aardbevingen.[2]

Aardbevingen in Nederland, in Vlaanderen? - Ja, het verschijnsel is zelden, maar minder uitzonderlijk dan u misschien zoudt denken. Gemiddeld eens in de drie jaar komt er wel een kleine schok voor, die in de kranten vermeld wordt. Meestal is het in Zuid-Limburg dat de aardbeving het duidelijkst gevoeld wordt; de trillingen zijn dan afkomstig uit de omgeving van Aken of de Eifel. Maar in andere gevallen zijn ook schokken gevoeld in Utrecht, Haarlem, Harderwijk, Groningen. Bijna altijd zijn het ‘tektonische aardbevingen’, die ontstaan doordat een spanningstoestand in de struktuur der aardlagen zich vereffent.

Eerst en vooral naar 't horloge grijpen en *de tijd* optekenen! Later dan het horloge vergelijken met stationsklok of radiosein. Zo is vergelijking met andere waarnemers mogelijk, wat van belang is om uit te maken of men zich niet vergist heeft, en om verschillende schokken die soms kort op elkaar volgen te kenmerken. Schrijf daarna nauwkeurig op of u één enkele stoot gevoeld hebt, ofwel een opeenvolging van zwakke, sterke, en weer zwakke

1) Rep. Brit. Ass. **52**, 90, 1882.
2) Een standaardwerk is bv. Sieberg, Erdbebenkunde (Jena, 1923).
Aardbevingen uit de laatste tijd in Nederland: 1905, 1906, 1926, 1928, 1931, 1932; zie Hemel en Dampkring.
Voor Vlaanderen: vgl. Ciel et Terre, **8**, 27, 1887.

stoten. *De tijdsduur* van het verschijnsel wordt bijna altijd overschat, tengevolge van de angst en de spanning. *De richting* waarin de schokbeweging gebeurt wordt dikwijls door toevallige omstandigheden bepaald; over 't geheel nochtans geschiedt de schok vlak bij de aardbevingshaard in opwaartse richting; op grotere afstand gaat de horizontale componente meer en meer overwegen, zodat we 't gevoel krijgen ‘van een jongen die door den schoolmeester heen en weer geschud wordt’. Naar welke richting vallen voorwerpen om? Als lampen heen en weer gaan schommelen, naar welke hemelstreek schommelen ze? Uit dergelijke aanwijzingen is soms de richting van de schok en dus ook van de haard af te leiden. Buitengewoon overschat men altijd *de amplitude* van de trillende beweging; bij de aardbeving van 1928 in Zuid-Limburg schatten de mensen dat de aarde wel 1 cm opgelicht was, terwijl de seismograaf aldaar 0,01 mm aanwees! We schijnen ongelofelijk gevoelig voor vertikale bewegingen, vooral als we zitten of liggen. Altijd geve men op waar men zich bevond en wat men uitvoerde, want een zwakke aardbeving wordt veel beter gevoeld als men zich rustig binnenshuis bevindt dan als men wandelt; ook bemerkt men het schudden duidelijker naarmate men zich op een hogere verdieping van het huis bevindt (dat kan per verdieping wel 0,4 eenheden van de sterkteschaal schelen; zie verder). Hoorde men enig *aardbevingsgedruis*? Misschien een dondergeluid als van ‘zware vaten die men voortrolt’ (Harderwijk 1905), misschien een doffe knal? Dit geluid komt ongeveer tegelijk aan met de longitudinale golven die zich door de aarde voortplanten; pas daarna bereiken ons de veel sterkere golven die langs het aardoppervlak lopen, zodat we in 't algemeen het geluid vóór de eigenlijke schok waarnemen.

Van het grootste belang is de bepaling der *sterkte* van de aardbeving.

Oorspronkelijk kon men die niet meten in mechanische eenheden, en heeft men zich beholpen door willekeurige, empirische schalen samen te stellen. Later heeft men die schattingen vergeleken met de optekeningen der instrumenten, en elke sterktegraad gekenmerkt door *de grootste versnelling* welke bij de trillingen optreedt. De sterkteschalen hebben nog altijd een zeer groot nut, om de vele berichten van toevallige waarnemers onderling te vergelijken. We geven hier de omschrijving der 5 eerste trappen van de 12-delige schaal van Mercalli-Cancani-Sieberg, die thans algemeen gebruikelijk is. Het is slechts een heel enkele keer dat in Nederland een grotere sterkte bereikt is (20 Nov. 1932, bij Uden, tot schaalnummer VII; 11 Juni 1938, tot VII in Oost-Vlaanderen, VI in Zeeland).

I. *Onmerkbaar* (grootste versnelling ≤ 0,25 cm/sec).
Slechts door instrumenten opgetekend.

II. *Zeer licht* (0,25 - 0,5 cm/sec.).
Slechts door een klein aantal zenuwachtige of zeer gevoelige personen gevoeld, die zich in volmaakte rust bevonden, vooral op de bovenste verdiepingen der huizen.

III. *Licht* (0,5 - 1,0 cm/sec.).
Zelfs in een dicht bevolkte streek wordt de aardbeving slechts door een klein gedeelte van de bevolking waargenomen als het dreunen van een snel vorbijrijdende wagen. Nu en dan kan men de duur en soms ook de richting der beweging schatten. Vele personen bemerken eerst naderhand, door er met anderen over te praten, dat ze met een aardbeving te doen hadden.

IV. *Matig* (1,1 - 2,5 cm/sec.).
In open lucht zijn er weinig personen die de aardbeving bemerken. Binnenshuis wordt ze door talrijke, hoewel niet door alle personen waargenomen. Meubels sidderen of schommelen even heen en weer, daardoor rammelen glazen en keukengerei zachtjes tegen elkaar, alsof er een zware vrachtwagen over een hobbelige straat voorbijreed. Ruiten trillen; deuren, balken, vloeren kraken; plafonds knetteren. Vloeistoffen in open vaten komen in lichte beweging.
Schrik wordt door die beweging zo goed als niet veroorzaakt, tenzij als de bewoners door andere aardbevingen reeds zenuwachtig en angstig geworden zijn.
Hier en daar ontwaakt iemand die sliep.

V. *Tamelijk sterk* (2,6 - 5,0 cm/sec.).
Zelfs in het geroezemoes van het dagelijks leven wordt de aardbeving door zeer talrijke personen op straat of buiten opgemerkt; binnenshuis wordt ze algemeen waargenomen door de siddering van het gehele gebouw. Men heeft de indruk dat er in huis een zwaar voorwerp omgevallen is (zak, meubel), of men schommelt op zijn stoel of in zijn bed als in een schip op zee. Planten, twijgen en dunne takken van struiken en bomen bewegen zichtbaar, als bij zwakke wind. Vrij hangende voorwerpen zoals gordijnen, hangplanten, lampen en niet te zware kroonluchters gaan aan 't slingeren; bellen geven geluid; slingers van uurwerken blijven staan of slingeren in grote bogen, naarmate de stootrichting loodrecht of evenwijdig t.o.v. het slingervlak gericht is; stilstaande slingeruurwerken kunnen ook op gang komen; veren van uurwerken geven geluid; elektrisch licht flikkert of gaat uit doordat de draden der leiding tegen elkaar aan komen; platen slaan kletterend tegen de muren of veranderen van stand; uit bijna volle vaten wordt vloeistof gemorst; kleinigheden, portretraampjes enz. kunnen omvallen, alsook voorwerpen die tegen de muur rustten; lichte dingen kunnen zelfs iets van hun plaats verschoven worden; meubels rammelen; deuren en vensters slaan open of dicht; ruiten breken. De slapenden ontwaken algemeen. Hier en daar vluchten de bewoners buitenshuis.

Uit het nummer der schaal is de versnelling bekend, en hieruit kunnen we de amplitude der aardbevingsgolf onmiddellijk berekenen. Stel de trilling van het aardoppervlak voor als A sin $2\pi t/T$; dan is de grootste versnelling $4\pi^2 A/T^2$; voor een periode van de orde van 1 sekunde b.v., die veel voorkomt, en een amplitude

van 0,5 mm, wordt de versnelling 2 cm/sec^2, wat men aangeeft als 2 gal. Dit is een versnelling zoals die bij matig sterke aardbevingen optreedt, welke we ook hier een enkele maal te voelen krijgen.

De aardbeving kan zich ook door het water der zee voorplanten en door de opvarenden van een schip als *zeebeving* gevoeld worden (Harderwijk 1905). De stoot is dan echter altijd longitudinaal, en van beneden naar boven gericht.

Voor slechts 5 gulden kan men zich zelf een alleraardigste eenvoudige seismograaf vervaardigen, die automatisch registreert en ook verre aardbevingen optekent.[1)]

140. Het waarnemen van kleine trillingen der aardkorst.[2)]

Neem een bakje met kwik, en bekijk daarin het spiegelbeeld van een verre lichtbron. (ster, lantaarn). Zodra de grond gaat trillen ziet men het lichtpuntje bewegen, bij sterkere trilling wordt het onherkenbaar. De waarneming wordt nog nauwkeuriger als men er een toneelkijkertje bij gebruikt, dat op een of andere wijze vast opgesteld is.

In ons land zijn aardbevingen zo zeldzaam, dat we niet goed op zulk een gelegenheid kunnen wachten om de proef te nemen! De trillingen die het moderne zware verkeer veroorzaakt zijn echter van dezelfde orde als die van zwakke aardbevingen, ze kunnen met dezelfde hulpmiddelen geschat en met dezelfde instrumenten gemeten worden.

Onderzoek aldus op welke afstand van een spoorlijn de trillingen van een voorbijvliegende sneltrein nog net merkbaar zijn. De astronomen te Greenwich vonden dat dit bij ongeveer 350 m het geval was.

Bij een voorbijrijdende trein of vrachtauto is de trillingstijd van de grond van de orde 0,1 sec; als de amplitude op de plaats waar wij ons bevinden *5μ* bedraagt, is de versnelling

$$\frac{4\pi^2 A}{T^2} = 2 \text{ gal}$$

, en dus duidelijk voelbaar (sterkte IV). In de nabijheid van watervallen of zware sluisdeuren waar het water uitstroomt is de trillingstijd van de orde 0,005 sec, zodat de versnelling zelfs bij een kleine amplitude al aanzienlijk en de dreuning zeer merkbaar wordt.

De verkeerstrillingen hangen af van: *a*) de verdieping waarop men waarneemt; *b*) het verkeersmiddel; *c*) de toestand van de weg. Ze zijn des te sterker naarmate men zich hoger bevindt

1) H.R. Riggs, Scientific American, **99**, 263, 1908.
2) Vgl. Handbuch der Experimentalphysik, XXV_3.

en naarmate het verkeer sneller rijdt; op een slechte weg is de invloed van luchtbanden zeer merkbaar. - Schat allerlei verkeerstrillingen in de schaal van Mercalli-Sieberg. Men vindt bv. voor de 2e verdieping van een huis, dat een autobus of boerenkar de trillingssterkte III-IV veroorzaakt; op de begane grond veroorzaakt een vrachtauto de trillingssterkte IV. Merkwaardigerwijze zijn de versnellingen die men met verkeersseismografen bepaalt altijd groter dan die welke men uit de schaal van Mercalli-Sieberg zou afleiden; in de hier gegeven voorbeelden wezen de instrumenten een amplitude aan van 0,0004 cm en 0,0007 cm bij een trillingstijd van 0,05 sec en 0,065, dus versnellingen van 6 en 8 cm/sec^2, die met de schaalnummers V en VI zouden overeenkomen. Wellicht is de oorzaak der afwijking te zoeken in de afstomping der mensen voor de dagelijkse indrukken van het verkeer, terwijl een aardbeving als iets zeer bijzonders gevoeld wordt.

Is het niet mogelijk een eenvoudige objektieve schaal te vinden door op de hoger aangegeven wijze de trillingen van een bakje kwik te onderzoeken?

Een steen is een mooi ding, mooi in alle opzichten: zijn korrel, zijn kleur, zijn breuk, zijn glans, zijn hardheid, zijn evenvele eigenschappen die onze zintuigen oefenen en bevredigen, die ons opwekken tot nadenken.
G. Duhamel, La Possession du Monde, blz. 106.

Een steil walletje van een of andere losse grondsoort, dat aan weer en wind blootgesteld is geweest, bevat, al is het nog geen meter hoog, allerlei vormingen die een aandachtig waarnemer met grote voldoening zal opmerken. Het is vrijwel een verkleind model van een berghelling, uit zacht en uit los gesteente samengesteld; het heeft een bijna even grote verscheidenheid van karakter, en is in zijn vormen door niet minder strakke wetten beheerst. Het is in de eerste plaats gegroefd volgens golvende lijnen, veroorzaakt door het afstromen van de regen; kleine ravijnen die ingesneden zijn volgens precies dezelfde helling als die van de bergflanken zelf, en die graatlijnen overlaten, bijna even fraai van omtrek en mooi scherp gebeeldhouwd. Waar er een hardere knobbel in de grond zit of een steen is de aarde daaronder weggespoeld en daarboven opgestapeld; en daar hebben we een kleine afgrond, boven door een vloeiende lijn verbonden met de algemene helling, en een scherpbegrensde schaduw vertonend; waar de grond zacht was, zal hij waarschijnlijk onderaan weggespoeld worden tot hij afbrokkelt, en er een ingekerfde, overhangende onregelmatige breuklijn overblijft .... Waar deze invloeden lang hebben doorgewerkt, en de plantengroei geholpen heeft om de omtrekken te verzachten, is onze grond geboetseerd tot sierlijke en grillige oppervlakken van oneindige verscheidenheid, maar altijd zo onderling verbonden en op elkaar betrokken, dat het oog ze nooit als afzonderlijke details voelt ....; het zijn geen herhalingen de een van de ander, maar verschillende delen van eenzelfde stelsel.
J. Ruskin, Modern Painters, III, 480.

Waaiende lucht.

Wees geloofd, Heer, om onzen broeder de wind en om de lucht en de wolk, om de heldere hemel en om elk weer waarbij Gij Uw schepselen laat leven.
Franciscus van Assisi, Loflied.

141. De aneroïde.

Geen instrument lijkt zo eenvoudig af te lezen als de aneroïdebarometer: het is voldoende zachtjes tegen het glas te tikken en op de blauwe naald te letten. Helaas zijn de correcties die men aan de aflezing moet aanbrengen nogal onzeker. Men corrigeert voor de hoogte boven de zeespiegel; de temperatuurinvloed, die afwijkingen tot wel 4 mm kan veroorzaken, is helaas zó onregelmatig dat er niet voor te corrigeren valt. Men moet de aneroïde dus vooral gebruiken voor het onderzoek van snelle veranderingen van de luchtdruk, niet voor het bepalen van het absolute bedrag ervan.

Bij het tikken ziet men meestal de blauwe naald een weinig verspringen, en nu hoort men wel eens beweren dat dit de richtting is waarin de luchtdruk net aan 't veranderen is. Een statistisch onderzoek heeft echter aangetoond dat dit slechts in 62% der gevallen uitkomt, althans als men drie maal daags waarneemt[1]. Blijkbaar vertoont de luchtdruk teveel onregelmatige kleine schommelingen.

Neem een aneroïde barometer zoals in onze huiskamer hangt, en vergelijk zijn aanwijzing in de kelder en op de zolder: het verschil is duidelijk merkbaar. Bestijg een hoge toren en lees telkens na 100 treden de stand van de naald af, zachtjes tikkend vóór elke aflezing. De druk neemt geleidelijk af; uit de hoogte van de toren vindt u dat dit afnemen ongeveer 1 mm per 10 meter bedraagt.

1) Hemel en Dampkring, **22**, 321, 1924.

142. De kwikbarometer.[1)]

Soms heeft men moeite met het aflezen van de juiste stand van de kwikzuil. Houd dan achter de buis een papiertje, waarvan de bovenste helft zwart is, de onderste wit. De meniskus kaatst het zwart terug en schijnt donker op heldere grond.

Het is van belang, te kunnen controleren of de ruimte boven het kwik wel geheel luchtledig is. Houd daartoe de barometer een weinig schuin: het kwik stijgt in de buis en moet nu met een korte, scherpe tik tegen het eind der buis aanslaan.

Aan de aflezing zijn de volgende correcties aan te brengen.

1. Het nulpunt der schaal moet met het onderste kwikniveau overeenstemmen; bij precisiebarometers is de schaal hiervoor instelbaar, bij eenvoudiger instrumenten is de correctie in rekening gebracht door de schaaldelen iets kleiner dan hele millimeters te maken. Meet na of dit bij uw barometer geschied is.
2. Stel t = temperatuur in graden Celsius van kwik en schaal. Om te vinden wat de aflezing bij 0° zou zijn, trekt men $\frac{1}{8}t$ mm van het afgelezen getal af.
3. Capillariteit. Bij een buis van 6 mm inwendige diameter is de top van de kwikkolom ongeveer evenveel te laag als de hoogte van de meniscus. Bij een buis van 12 mm, slechts het ⅙ gedeelte daarvan.
4. Herleiding tot zeeniveau. Op het bureau der Gemeentewerken kan men waarschijnlijk wel de hoogte van het terrein waar u woont boven het peil der zee opgeven; meet hoeveel hoger nog de barometer hangt. Voor elke 10 m hoogte boven zeeniveau moet men 1 mm bij de aflezing voegen.
5. Het verschil van de versnelling der zwaartekracht op verschillende breedten maakt dat er voor ons land 0,5 mm bij te tellen is om de aflezing te herleiden op de standaardbreedte 45°.

De correcties 4 en 5 zijn eens en vooral te bepalen en telkens als geheel aan te brengen.

Een algemene contrôle verkrijgen we door de barometer af te lezen op het ogenblik der ‘termijnwaarneming’ van een onzer meteorologische stations, dus 's ochtends te 8 uur; en dan bij ontvangst van het weerkaartje de waarde die we afgelezen hadden te vergelijken met wat onder het kaartje opgegeven staat. De moeilijkheid is echter, dat we in 't algemeen niet wonen

1) Hemel en Dampkring, **22**, 321, 1924. - W. Bleeker, Leerboek der Meteorologie, II, hoofdstuk 2 (Zutfen, 1942).

bij een der hoofdstations (De Bilt, Vlissingen, Maastricht, den

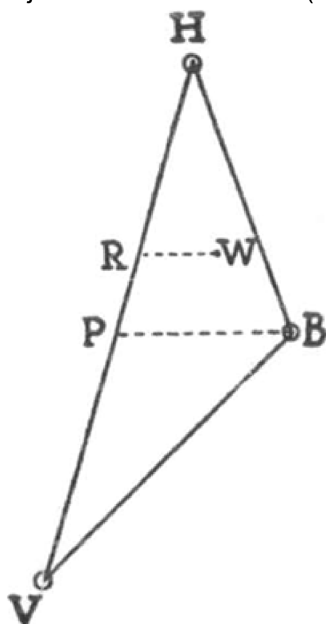


Fig. 115. Het vergelijken van een barometer met de opgaven van drie meteorologische hoofdstations.

Helder, Groningen), zodat we meestal moeten ‘interpoleren’.

Dat gaat het best zó[1]. Kies een dag waarop de drukking vrij gelijkmatig over Nederland verdeeld is, of waarop de lijnen van gelijke drukking ongeveer van onze woonplaats naar een der hoofdstations lopen. Stel we bevinden ons binnen de driehoek Den Helder-De Bilt-Vlissingen, en de volgorde dezer stations zij tevens die der afnemende barometerdrukkingen (fig. 115). Op de lijn VH moet er een punt P zijn waar de drukking dezelfde is als in B, waarschijnlijk zó gelegen dat

$$\frac{HP}{PV} = \frac{\text{drukverschil H—B}}{\text{drukverschil B—V}}.$$

De richting der isobaren is dus BP. Trek nu door W de lijn WR evenwijdig aan BP. De drukking in R, dus in W wordt gegeven door de evenredigheid:

$$\frac{\text{drukverschil H—R}}{\text{drukverschil R—V}} = \frac{HR}{RV}.$$

143. Waterbarometer. (fig. 116).

Neem een glazen kolf van 1 liter inhoud, doe er wat water in,

1) C.L. de Veer, Hemel en Dampkring, **6**, 56, 1908; daar is tevens een grafische methode meegedeeld voor 't geval dat men de bepaling herhaaldelijk wil uitvoeren.

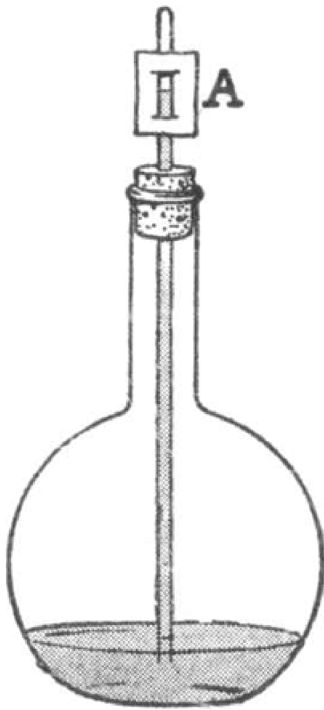


Fig. 116. Eenvoudige waterbarometer.

stop hem met een gummistop, waardoor een glazen buis tot bijna op de bodem daalt. Blaas even in het buisje zodat enkele bellen door het water borrelen: de druk in de kolf is dan een weinig toegenomen, en als u ophoudt te blazen stijgt het water, bijvoorbeeld tot A. Iedere verandering in de dampkringsdrukking zal nu het peil van het water in het buisje doen stijgen of dalen. Hoeveel? Het toestel is veel gevoeliger dan een gewone barometer, des te meer naarmate de kolf groter is en het buisje smaller. Het bezwaar is alleen dat het *temperatuurveranderingen* op dezelfde wijze aangeeft als *drukveranderingen*; maar hier kunnen we enigszins aan tegemoet komen, door de kolf in een kistje te zetten, en hem geheel in pakwatten of oude kranten in te pakken, terwijl alleen het boveneind van het buisje erboven uitsteekt.

Ga met de waterbarometer naar een andere verdieping: het water daalt of stijgt verscheidene millimeters. Op een toren bedraagt het hoogteverschil wel 10 cm.

> Bij de 'mondbarometer' kan het reservoir in de mond onder de tong gehouden worden, zodat men zeker is van een konstante temperatuur. Het toestelletje is gemakkelijk te maken en kan voor barometrische hoogtemeting goed gebruikt worden (Ann. Phys. 1902).

144. Variometer. (fig. 117).

Neem een glazen kolf van 2 1, die geen water bevat, en die u desnoods open aan de lucht laat staan tot hij droog geworden



Fig. 117. Eenvoudige variometer.

is. Stop hem met een kurk, waardoor een glazen buisje gaat van slechts 3 mm inwendige diameter, en dat omgebogen is zoals uit fig. 117 te zien is. Nu moet ervoor gezorgd worden dat de kurk een heel klein lek vertoont: we snijden een zeer smal gleufje in de zijwand van de kurk, zo ondiep, dat bij sterk aandrukken de sluiting vrijwel luchtdicht is, bij minder aandrukken een weinig lucht laat doorlekken. Breng een druppel benzol of xylol in het buisje - onze variometer is klaar.

We noemen hem een 'variometer', omdat hij de *veranderingen* van de luchtdruk aanwijst. Bij buiig, stormachtig weder is de druppel geen ogenblik in rust; hij verschuift over millimeters, zelfs centimeters. Het is een buitengewoon merkwaardig schouwspel om met dit instrument het voorbijtrekken van een bui te volgen.

Een deur die men opent of sluit geeft zeer plotselinge verplaatsingen. Daarentegen wordt een *geleidelijk* toenemen of afnemen van de luchtdruk niet opgetekend, omdat de overdruk zich dan intijds vereffenen kan door langs het lek weg te stromen.

145. Barometerdruk in vuurtorens.

De geweldige stormwinden die soms om de vuurtoren gieren, veroorzaken een overdruk, een stuwing aan de loefzijde, een onderdruk aan de lijzijde. Zet men een raam open naar de ene of naar de andere dezer twee kanten, dan kan men de drukverandering zeer duidelijk merken aan de aneroide-barometer in de toren. Zijn alle ramen en deuren dicht, dan stelt zich de

drukking door reten en kieren toch in op de *gemiddelde* drukking van de lucht in de omgeving, en die ligt iets *lager* dan de normale druk. Bij een bepaalde toren werd gemeten:

windsterkte 6	onderdruk 0,4 mm
7	onderdruk 0,7
8	onderdruk 1,2
9	onderdruk 1,8

146. Natuurverschijnselen bij veranderende barometerdruk.

1. *Blazende putten.*[1] - In verschillende landen heeft men opgemerkt aan sommige diepe putten, meestal artesische boringen, dat bij *verandering* van barometerstand de lucht erin of eruit stroomt, naarmate de barometer stijgt of daalt. Als de put bedekt is met een doorboorde plaat of een doorboorde steen, is de luchtstroom door de opening zo sterk dat hij de vlam van een lucifer of een blad papier wegblaast; of dat hij een fluit of een hoorn kan aanblazen, die dan bij elke barometerverandering geluid geven. Met een waterbarometer, in de opening bevestigd, vond men slechts een overdruk van 2 cm water.
   De putten die dit verschijnsel vertonen zijn tenminste 25 m diep, soms 30, soms 45; meestal zijn ze geboord in grintlagen die met een weinig bouwgrond bedekt zijn. Men onderstelt dat de verandering van de luchtdruk het grondwater doet stijgen of dalen, en dat dit de lucht wegdrukt of opzuigt die de put vult en die ook overal in de tussenruimten tussen het grint doorgedrongen is. Als er wat water op de bodem van de put staat, kan men soms bij sterke barometerdaling horen hoe de luchtbellen door de waterlaag borrelen.
   In Zuid-Limburg zijn dergelijke verschijnselen waargenomen bij boringen[2]. Te Eygelshoven en te Meersen vond men, dat het uitblazen of inzuigen van lucht geschiedde door zeer bepaalde lagen, op diepten die van 37 m tot 78 m variëerden; de beweging van het grondwater speelde ook hier de voornaamste rol.
   Boringen nabij een bruinkolenmijn te Sittard vertoonden insgelijks het uitstromen van lucht, maar ditmaal vermoedelijk tengevolgen van chemische reakties die zich in de bruinkool-

1) Voor Engeland: Nat. **27**, 375, 1883; voor Zwitserland, Arch. sc. phys. nat. **19**, 487, 1905. Er zijn verscheidene blazende putten bij Le Havre, en een in het woud van Fontainebleau. Voor Amerika: Economic Geology, **15**, 6, 1920.
2) J.J. Pannekoek van Rheden, Eclog. geolog. Helvetiae, **16**, 455, 1921.

lagen voltrekken. De richting van de luchtstroom keerde om bij weeromslag.

2. *Schuim op het water*.[1] - Aan sommige vijvers is opgemerkt, dat zich af en toe schuim op het water verzamelde, waarschijnlijk bij een plotselinge daling van de barometer. Kleine gasbelletjes die net niet kunnen opstijgen omdat er korreltjes aarde aan vastzitten, zetten wat meer uit en komen boven; de vijver bedekt zich met groenachtig slijm en resten van vergane bladeren.

3. *Bruinkleuring van stilstaande sloten*.[2] - In moerassige gebieden van N.W-Duitsland en het aangrenzende stuk van Nederland heeft men opgemerkt dat bij dalende barometer de sloten zich sterk geel kleuren. Het verschijnsel is het duidelijkst, waar zand of leem het moeras bedekt, bv. in oude rivierbeddingen; het van de lucht afgesloten veen ontwikkelt grote hoeveelheden moerasgas (CH_4), die ook ferrobicarbonaat meeslepen. Dit zout ontbindt zich gemakkelijk, en het gevormde ferrohydroxyde wordt aan de lucht tot bruin ferrihydroxyde. Naarmate de luchtdruk daalt of stijgt zijn de gasontwikkeling en de bruinkleuring sterker of zwakker.

4. *Afbladderen van mijngangen*.[3] - Het schijnt dat bij dalende barometerdruk stukjes van het gesteente in de gangen van koolmijnen afbladderen. Dit zou te verklaren zijn door de uitzetting der lucht in de spleten en poriën.

147. Het oor als barometer.[4]

Snelle drukveranderingen voelt men door een eigenaardige spanning in het trommelvlies van het oor; door te slikken herstelt men dan gemakkelijk langs de buis van Eustachius de gelijkheid van druk binnen en buiten. Sommige mensen zijn erg gevoelig voor dit effekt, waarschijnlijk omdat de buis van Eustachius bij hen min of meer verstopt is. In de eerste der hierna opgesomde gevallen is de drukverandering door iedereen waarneembaar; in de volgende is ze toenemend moeilijk op te merken.

In een vliegtuig, vooral bij de daling.

In een lift, vooral in de snelle liften van kolenmijnen of torenhuizen.

1) Nat. **69**, 1903-4.
2) Met. Zs. **52**, 158, 1935.
3) J.R.A. Soc. Canada, **16**, 165, 1922.
4) Nat. 29, 1884.

Als de trein een tunnel binnenrijdt of eruit komt.

Als de deuren van een kamer dicht zijn, en men ineens het raam opent waarop de stormwind staat.

Als men met alle kracht de kamerdeur plotseling opent of sluit.

148. De luchtweerstand van een bol.

Op een mooie Zaterdagnamiddag, in 't voorjaar, hebben we boodschappen in de stad gedaan en keren terug met twee van die leuke kinderballonnetjes die men af en toe als geschenk krijgt in de grote warenhuizen; we hebben ze zo goed mogelijk bolvormig gekozen. - We beginnen met een ballonnetje te meten en te wegen. Het is een beetje langwerpig, de grote as is 35 cm lang, dwars daarop heeft het een middellijn van 30 cm.

Aangezien de inhoud van een bol $4/3\pi r^3$ is, schatten we hier: $4/3\pi.17_5 \times 15 \times 15 = 16{\cdot}600$ cm^3 = 16,6 liter. Het gewicht is negatief, want het ballonnetje heeft *stijgkracht*; als ik er 15 g aan bind blijft het bijna zweven in de lucht, daalt heel langzaam; met 20 g eraan bevestigd weegt het geheel 5,5 g, de ballon had dus een stijgkracht van 20 - 5,5 = 14_5 g. Het omhulsel van een ballonnetje waar al het gas uit ontsnapt is, blijkt 3 g te wegen; het gas alleen had dus een stijgkracht van $14_5+3 = 17_5$ g. Als s het gewicht van een liter gas voorstelt, moet $16{,}6(1{,}293-s) = 17{,}5$ dus $s = 0{,}23$ g per liter. Hieruit volgt met stelligheid dat het ballonnetje met waterstof gevuld was; maar blijkbaar was er door diffusie al wat lucht bijgekomen.

Als men zulk een ballonnetje zou loslaten, zou het eerst langzaam, dan sneller stijgen, tot het een bepaalde grenssnelheid bereikt heeft, waarbij de wrijving tegen de lucht net even groot is als de stijgkracht. Doordat het ballonnetje echter zo groot is en de stijgkracht betrekkelijk gering, wordt die grenssnelheid in de praktijk bijna onmiddellijk bereikt.

We nemen de proef eerst in onze huiskamer, met het horloge in de hand, en bepalen in hoeveel tijd het ballonnetje van de vloer tot het plafond opstijgt. - Veel mooier gaat het echter buiten, als we een windstil plaatsje achter het huis kunnen vinden. Een draad dun naaigaren van 10 of 20 meter lengte wordt met zijn ene uiteinde aan een zware steen vastgemaakt, met zijn andere uiteinde aan het ballonnetje; wees niet bang voor verwarren van de draad, laat hem eenvoudig op een hoopje op de grond liggen zoals hij zichzelf legt, dan komt het best terecht. Dan weer de ballon oplaten en nauwkeurig de tijd bepalen die verloopt tot hij over de volle lengte van de draad opgestegen

is. De proef kan nu herhaald worden nadat we bekende gewichtjes onder aan het ballonnetje hebben bevestigd. Zelfs kunnen we een deel van het gas uitlaten, om de invloed van de afmetingen

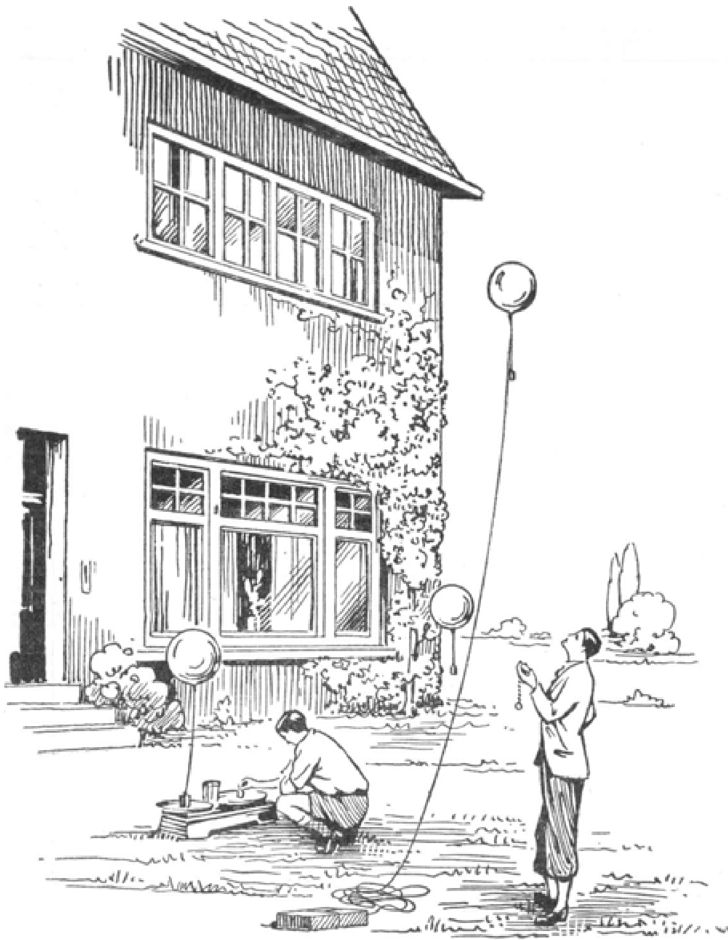


Fig. 118. Het oplaten van luchtballonnetjes om de weerstand van een bol te onderzoeken.

te kunnen onderzoeken; het is duidelijk dat hetgeen er op aankomt vooral de doorsnede van het ballonnetje in een *horizontaal* vlak is, en die is weer het eenvoudigst vast te leggen door met

een touwtje de omtrek van de horizontale doorsnede te meten, daaruit r, r^2 en $\pi r^2 = S$ te berekenen.

De weerstand S van een bol, die bij onze proeven gelijk is aan de stijgkracht, is evenredig met het oppervlak F van zijn doorsnede, met het kwadraat van zijn snelheid v, met het soortelijk gewicht γ van de vloeistof of het gas waarin hij beweegt (althans indien de omstandigheden niet àl te zeer worden gewijzigd). Men schrijft in de techniek gewoonlijk:

$$S = c_w \frac{\gamma}{g} \frac{v^2}{2} F,$$

waarin alle grootheden in de technische eenheden meter, sekunde kilogram-kracht uitgedrukt zijn. Dan wordt in gewone omstandigheden $\gamma = 1{,}225$ kg/m^3, $\gamma/g = 0{,}125 = 1/8$. Dus

$$v = \sqrt{\frac{2}{c_w} \cdot \frac{g}{\gamma} \cdot \frac{S}{F}} = \sqrt{\frac{16}{c_w} \cdot \frac{S}{F}}.$$

Hier volgt een deel van de uitkomsten die ik verkreeg toen ik de proef het eerst uitvoerde.

***F* = opp. doorsnede**	***S* = stijgkracht**	**stijghoogte**	**tijd**	***v***	**$c_w = 16\ S / Fv^2$**
0,0659 m^2	0,0094 kg-gew.	3 m	1,75 sec	1,72 m/sec	0,77
0,0659 m^2	,0044	3	2,35	1,28	0,65
0,0659 m^2	,0021	3	2,95	1,02	0,49
0,0659 m^2	,0086	16,8	10	1,68	0,74
0,0659 m^2	,0088	9,0	5,8	1,55	0,88
0,0659 m^2	,0017	9,0	10,5	0,86	0,56
				Gemiddeld:	0,68

't Gemiddelde van alle proeven gaf de formule:

$S = 0{,}66\ v^2 F/16$,

wanneer v in m/sec, S in kg-gewicht, F in m^2 uitgedrukt wordt. De vrij goed constante waarde die we voor c krijgen, bewijst dat inderdaad de weerstand ongeveer evenredig is met het kwadraat der snelheid (bij veel groter snelheden komen er complicaties). De hier gevonden formule zal ons later dienen als we een loodsballon oplaten en de snelheid van de wind in hoge lagen berekenen (§ 160).

Om onze formule ook te toetsen voor veel kleinere bollen en de invloed van de afmetingen te onderzoeken, moeten we een

geheel ander soort proef nemen. Koop een ping-pong balletje, zo'n heel licht en effen celluloid dingetje, en bevestig er een draadje aan met een weinig kleefwas. Spring nu op de fiets, rijd langs een goed beschutte windstille weg, en houd de draad als slinger iets vóór u en naast u, zodat het balletje de volle luchtstroom krijgt. Het wijkt achteruit en de draad gaat schuin hangen. Bij een snelheid van 15 km per uur hing de slinger onder een hoek die ik op 8° schatte, bij 20 km per uur werd de hoek wel 20°

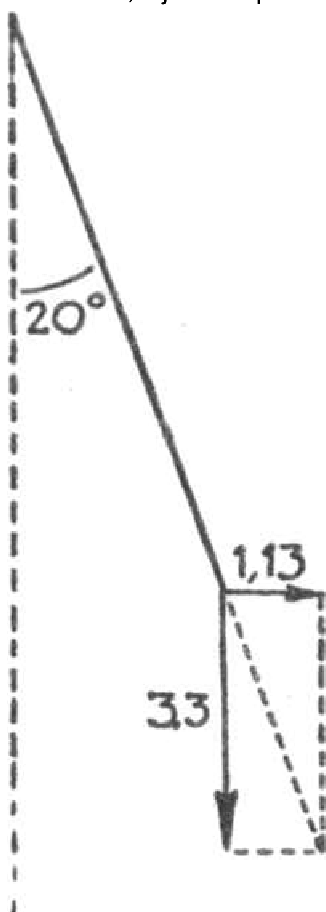


Fig. 119.

(fig. 119). Het balletje bleek 3,3 gram te wegen; de wrijving was dus achtereenvolgens 3,3 . tg 8° = 0,46 g-gew. en 3,3 . tg 20° = 1,20 g-gew. bij snelheden van 4,2 m/sec en 5,5 m/sec. Aangezien het oppervlak der dwarse doorsnede 11,1 cm^2 bedroeg, is de constante c_w van onze formule 0,37 of 0,57, gemiddeld 0,47. Dus geheel van dezelfde orde als met ons ballonnetje bepaald was! De weerstand van een bol is dus inderdaad evenredig met het oppervlak van zijn doorsnede.

Volgens de beste officiële metingen moest c_w = 0,45 zijn. De overeenstemming van onze ruwe metingen (0,66 en 0,47) met het zorgvuldig in de windtunnel bepaalde getal is niet onbevredigend. Dat wij iets kleiner snelheden, dus iets groter luchtweerstand vinden, is wellicht te wijten aan de oneffenheden op onze ballen, waardoor wervels veroorzaakt worden, en aan de onvoldoende wervelvrijheid van de lucht waarin we werken.

149. Vallende lichamen met weinig luchtweerstand.

Om de valbeweging te onderzoeken volgen we 't voorbeeld van Galilei en maken gebruik van een uitzichtstoren of van 't balkon van een hoog gebouw. Neem een lang touw, en bevestig daaraan stukjes lood of ijzer of wilde kastanjes, op afstanden van 4 m van elkaar.

Neem een tweede touw, en bevestig daaraan dergelijke gewichtjes op afstanden 0; 1,25 m; 5 m; 11,25 m van het uiteinde (dus 1,25; 3,75; 6,25 m van elkaar). - Begeef u nu op het balkon en laat het eerste touw zo hangen, dat het onderste gewichtje net de grond raakt. Als u nu het touw ineens loslaat, hoort u de tikken van de vallende gewichtjes, en wel met steeds korter wordende tussenruimten: vallende voorwerpen krijgen dus een geleidelijk toenemende snelheid. Herhaal de proef met het tweede touw: ditmaal zijn de tussenruimten tussen de tikken

gelijk; in tijdsruimten 1, 2, 3, ... zijn dus de afgelegde wegen 1,25 m; 4 × 1,25 m; 9 × 1,25 m; ....

Doe de laatste proef nog eens, maar tel daarbij zo nauwkeurig mogelijk sekunden, beginnend met 0 op het ogenblik dat u het touw loslaat. De tikken blijken nu precies met tussentijden van ½ sekunde op elkaar te volgen. Een vrij vallend voorwerp legt dus in de eerste sekunde een weg af van 5 meter; na t sekunden is de afgelegde weg (in meters) ongeveer:

$s = 5t^2$.

Gooi met alle kracht een kei recht omhoog, en laat een helper nauwkeurig bepalen hoeveel sekunden en tienden van een sekunde verlopen eer de kei weer op de grond terugvalt (§ 10). Hij houdt het horloge aan zijn oor, en begint te tellen op het preciese ogenblik, waarop de steen wegvliegt (**0** 1 2 3 4 **1** 1 2 3 4 **2** ...): een prachtige oefening om korte tijden nauwkeurig te leren bepalen! Herhaal de proef enkele malen en neem het gemiddelde t van de uitkomsten. Hieruit volgt nu vooreerst, met welke snelheid v_0 de steen omhooggegooid is: uit hoofde van deze worp zou de steen in een tijd t opgestegen zijn tot een hoogte v_0t; maar tevens is de steen gevallen over de afstand $\frac{1}{2}gt^2$. Als de steen terug op de grond komt is $v_0t = \frac{1}{2}gt^2$, dus $v_0 = gt/2$. Voor mijzelf is $t = 3{,}0$ sec, dus $v_0 = 15$ m/sec. - De steen stijgt zolang, tot de valsnelheid net gelijk is geworden aan de worpsnelheid, dus tot $gt_m = v_0$; hieruit volgt: $t_m = v_0/g = t/2$. De steen gebruikt dus evenveel tijd om zijn hoogste punt te bereiken als om terug te vallen. - Tenslotte kunnen we ook de bereikte hoogte vinden: $v_0t_m - \frac{1}{2}gt_m^2 = gt_m^2 - \frac{1}{2}gt_m^2 = \frac{1}{2}gt_m^2$. In ons geval komt er: 11,0 meter.

150. Snelheid van vallende regendruppels.[1)]

Als het regent terwijl we in de trein zitten, kunnen we mooi de regendruppels in evenwijdige schuine strepen langs de ruiten zien lopen. Die druppels zijn van zó hoog gevallen, dat ze al lang een eenparige snelheid hebben gekregen, evenals ons ballonnetje, vallende sneeuwvlokken, of luchtbelletjes die in 't water opstijgen. De eindsnelheid kunnen we nu bepalen uit de richting der regenstrepen (fig. 120): de druppel verplaatst zich op de ruit

1) Reeds bij Rozet, C.R. **33**, 581, 1851.

in vertikale richting AB door zijn valbeweging, in horizontale

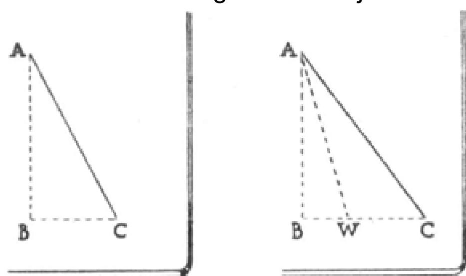


Fig. 120. Sporen van vallende regendruppels op de ruiten van een trein. Links: bij windstille lucht. Rechts: bij wind.

richting BC doordat de trein een eigen snelheid heeft; de regenstreep is de resultante van het snelheidsparallelogram.

Hieruit volgt:

$$\text{snelheid der regendruppels} = \text{snelheid trein} \times \frac{AB}{BC}$$

. De snelheid van een trein is van de orde van 25 m/sec; voor de regendruppels vindt men snelheden van enige m/sec.

Tot hiertoe hebben we aangenomen dat de regendruppel vertikaal viel; mocht echter reeds een helling van de regenstrepen waar te nemen zijn eer de trein in beweging gekomen is, dan krijgen we:

$$\frac{\text{trein} + \text{wind}}{\text{regen}} = \frac{BC}{AB} \quad ; \quad \frac{\text{wind}}{\text{regen}} = \frac{BW}{AB} \quad ; \quad \frac{\text{trein}}{\text{regen}} = \frac{CW}{AB}.$$

.

Opvallend is het verschil tussen regenstrepen van grote en van kleine druppels; deze laatste hellen veel meer, blijkbaar vallen ze met een aanzienlijk kleinere snelheid dan de grote. Laten we eens een stoute sprong wagen, en uit onze waarnemingen met het loodsballonnetje en het ping-pong balletje afleiden hoe snel een druppel van gegeven afmetingen vallen moet.

De stijgkracht van het ballonnetje is hier te vervangen door het gewicht van de druppel. We hadden (§ 148):

$$v = \sqrt{\frac{16}{0{,}55} \cdot \frac{1000 \cdot {}^4/_3 \pi r^3}{\pi r^2}} = 6{,}2\sqrt{1000r} = 6{,}2\sqrt{r_{mm}}.$$

Uit proeven is gebleken dat deze wet inderdaad heel aardig klopt, zolang de druppels niet al te klein worden. Een druppel van 2 mm middellijn valt dus met een snelheid van 6 m per sekunde.

Het is eigenlijk wel merkwaardig dat die regenstrepen zo mooi recht zijn. Ongetwijfeld vermindert de snelheid van de druppel tengevolge van de wrijving, maar neemt hij ook iets over van de snelheid van de trein; tevens wordt hij kleiner; en dan is er

nog de invloed van de luchtstromen om de trein. In elk geval blijkt de resulterende baan praktisch recht, althans over het kleine stukje waarover men die baan opgetekend ziet. Wel kan men opmerken hoe een druppel die een regenstreep heeft beschreven, dikwijls aan het eind van zijn baan, als hij tot stilstand gekomen is, een paar andere druppels opneemt en in een bijna vertikale richting naar beneden rolt; hier heeft de oorspronkelijke valsnelheid bijna geen invloed meer.

Om de helling der regenstrepen te bepalen is er echter gelukkig een andere methode, die aan geen enkele bedenking onderhevig is. Let eens op de arcering die het gehele landschap overdekt: zij ook verandert van richting zodra de trein in beweging komt; en in dit geval weten we met zekerheid dat we de valsnelheid bepalen, buiten elke complicatie om van wrijving tegen de ruiten. U zult bevinden dat ze zowel bij stilstand als bij beweging van de trein vrijwel evenwijdig gericht is aan de regenstrepen die zich op de ruit aftekenen. Dit bewijst dat de storingen die wij vreesden toch maar een geringe invloed op het verschijnsel hebben. De direkte waarneming der regenarcering door het open raampje geeft ons daarenboven nog de mogelijkheid, de strepen over een grote afstand te overzien, en waar te nemen dat deze strepen geheel recht zijn; waaruit volgt dat de druppels werkelijk een eindsnelheid hebben bereikt, en niet meer sneller en sneller vallen door de invloed der zwaartekracht.

Let ook op de regenarcering terwijl u in een tram rijdt, in een auto, op de fiets. Nog eenvoudiger: bemerk hoe die richting verandert, al naarmate u loopt of stilstaat (natuurlijk altijd dwars op uw beweging kijken, dus naar rechts of naar links!). Of beweeg het hoofd snel naar rechts en naar links: u ziet de helling der regenstrepen bij iedere zwaai van het hoofd afwisselend groter en kleiner worden!

Al deze waarnemingen bewijzen duidelijk dat de regenstrepen eenvoudig snel vallende *druppels* zijn, die op het oog de indruk van lijnen maken; maar dat het helemaal geen *straaltjes water* zijn zoals u misschien gedacht had. Want al loop ik nog zo hard, of al zit ik in een trein, nooit zou een vertikaal hangend touw mij daardoor schuin schijnen!

U kunt zich daar rechtstreeks van overtuigen, door vlak naast een huis te gaan staan en bijna vertikaal omhoog te kijken. Tegen de donkere achtergrond van dak of dakgoot of tegen de heldere hemel ziet u de druppels vallen, en doordat u bijna in hun valrichting kijkt, ziet u ze vertraagd: het zijn afzonderlijke heldere of donkere bolletjes, geen lijntjes. Het is leuk om op te merken

hoeveel kleine druppeltjes er naast de weinige grote vallen. Let ook op hoe een grote druppel die van de dakrand valt bijna altijd door een kleintje gevolgd wordt, soms door twee kleintjes; men ziet hoe de afstand tussen de grote en de daaropvolgende kleine druppel tijdens het vallen toeneemt, tengevolge van het verschil in luchtweerstand.

Richt een camera met volle opening op een donkere muur of open deur. De camera is ingesteld op 3 meter. Als het regent maakt u enkele momentopnamen met 1/25 sekunde belichtingstijd. Ze vertonen de regen als streepjes, waarvan de lengte afhangt van de grootte van de druppels; uit de opname kan men het aantal druppels van elke verschillende snelheid bepalen, en dit met onze formule omrekenen in de straal der druppels. Is de camera niet zeer lichtsterk, dan moet men wachten tot de zon toevallig eens schijnt terwijl de regen valt en ze de druppels doet schitteren; het mooist is dit te zien tegen een donkere achtergrond, in een richting, die een kleine hoek maakt met de richting naar de zon.

Het giet, *het giet gestadig*! *Geen losse druppels meer*; *Maar vast en ijzerdradig*,
Rechtresemend en zeer .....
René de Clercq,
Lenteregen.

151. Vallende sneeuwvlokken.

Sneeuwvlokken vallen zo langzaam dat men ze gemakkelijk met het oog kan volgen; duidelijk kan men zien hoe ze met een mooie, eenparige beweging neerkomen. Dat ze zoveel langzamer vallen dan regendruppels is aan hun veel grotere luchtweerstand te wijten.

Bij zeer rustig weer gaan we de snelheid bepalen waarmee de sneeuwvlokken dalen. Op het ogenblik dat we een bepaalde vlok de horizonlijn zien kruisen, beginnen we sekunden te tellen: 0, 1, 2, 3, ... en we letten op wanneer die vlok op de grond aankomt. Dit is in 't algemeen tussen twee tellen in; schat tiende delen van een sekunde (‘oog- en oormethode’). De valhoogte is gelijk aan de afstand van ons oog boven de grond. In een bepaald geval vond ik dat de vlokken gemiddeld een snelheid hadden van 0,75 m/sec. - Men kan ook een huis of een boom van bekende hoogte uitzoeken, en een vlok volgen die daar dicht tegenaan valt.

Naar mijn ervaring vallen de grote vlokken merkbaar sneller

dan de kleine, men ziet ze vooruitsnellen; de verhouding der snelheden is bijvoorbeeld 1,3. Dat lijkt zeer begrijpelijk, want de luchtweerstand neemt toe met de tweede macht der afmetingen, het gewicht echter met de derde macht, zodat de invloed van de wrijving relatief kleiner wordt, de eindsnelheid dus groter. Andere waarnemers spreken dit nochtans tegen; Maille deelt mee, dat vlokken van 3 tot 4 cm grootte met een snelheid van 0,25 tot 0,35 m/sec vallen, vlokken van 1 cm met een snelheid van 0,80 m/sec. Dat kan alleen als de grote vlokken luchtiger gebouwd zijn dan de kleinere, wat natuurlijk bij bepaalde weersomstandigheden voorkomen kan. Een andere schrijver[1)] bevestigt onze ervaring en geeft op: 1,80 m/sec voor vlokken van 2 cm; 1,10 m/sec voor vlokken van 5 mm. Ongetwijfeld zal ook de ‘natheid’ van de sneeuw een grote invloed op de valsnelheid hebben. - Bijna alle vlokken draaien terwijl ze vallen; ze zijn nooit geheel symmetrisch en werken dus altijd min of meer als een schroef. Denk aan vallende lindevruchtjes!

Na het waarnemen van de dalende sneeuwvlokken ondergaat men een zeer sterke gezichtsbegoocheling: alle voorwerpen schijnen van beneden naar boven te bewegen! - Zie hiervoor I § 108.

> Als de sneeuw uit een wolk valt die 2000 m hoog is, hoelang doet zij er dan over voor ze beneden is? Hoever kan ze worden meegevoerd door wind van 8 m/sec eer ze de grond bereikt?

We hebben de snelheid van regendruppels bepaald uit de sporen die ze achterlaten op de ruiten van een bewegende trein. Bij sneeuwvlokken is dat niet mogelijk; maar men kan wel van uit de trein naar buiten kijken en de richting waarnemen van de arcering waarmee de vallende vlokken het landschap bedekken. Men bevindt dat ze bijna *horizontaal* schijnen te bewegen. Inderdaad is hun valsnelheid *zeer* klein ten opzichte van de snelheid van de trein, en wel ongeveer 0,75/25 = 1/30; dat is niet goed meer te bepalen. Het lukt echter wel als men eenvoudig gaat lopen met een normale snelheid van 5 km/uur of 1,4 m/sec: de schijnbare valrichting is dan heel sterk verschillend van de ware.

Als men 's avonds vóór in een auto zit, en door een bui van kleine sneeuwvlokjes rijdt, kan men een treffend schouwspel bijwonen. Het felle zoeklicht van de auto verlicht de vlokjes, en men ziet ze allemaal lichtlijntjes aftekenen die uitstralen

1) Met. Mag. **56**, 95, 1921.

van een punt vlak vóór ons. De beweging van de auto is zó snel, dat ik ten opzichte daarvan de vlokken wel als in rust kan beschouwen; ik kan mij dus ook de auto stilstaand voorstellen, en alle vlokjes met grote snelheid horizontaal naar hem toe bewegend. En nu is het een bekend perspektivisch effekt, dat al die evenwijdige banen schijnen uit te stralen van een vluchtpunt in de verte, zoals spoorrails en telegraafdraden, en zoals vallende sterren die van een ‘radiant’ uitstralen. - Mocht de valsnelheid der sneeuwvlokken niet geheel te verwaarlozen zijn, dan zou ik mij al de relatieve snelheden moeten voorstellen als een weinig hellend ten opzichte van de horizontaal, zodat het uitstralingspunt niet op de gezichteinder, maar iets hoger ligt. Is daar iets van te bemerken? Bereken dan uit die hoogte de valsnelheid van de vlokken!

152. Vallend water.

De ‘echoput’ te Hoog Soeren, bij Apeldoorn, is ongeveer 80 meter diep. Laat men er een schep water in vallen, dan horen we het plassen na 7 tot 8 sekunden. Het geluid heeft 0,2 sec nodig gehad om ons oor te bereiken (II § 3), het water doet dus ongeveer 7 sec over het vallen. Volgens de formule der valbeweging mocht het maar 4 sec zijn: het verschil is natuurlijk te wijten aan de luchtweerstand.

Eigenlijk is het verrassend dat het water nog *zo snel* aankomt. Want men kan door proeven laten zien dat een vallende watermassa zich in druppels verdeelt die niet sneller kunnen vallen dan met een snelheid van 8 m/sec, hetgeen in dit geval een valtijd van 10 sekunden zou opleveren; werd de snelheid groter, dan zou de sterkere luchtstroom de druppels fijner verdelen, en zo zou de luchtweerstand hen weer sterker remmen. - Hier is blijkbaar de afstand van 80 m nog te klein, het water wordt niet ineens tot druppels uiteengeblazen.

Men zou moeten beproeven hoelang *druppels* water er over doen.

153. Stand van vallende voorwerpen.

Tot 1906 heeft men aangenomen dat vallende voorwerpen zich zó instellen dat hun weerstand een minimum is. Toch zijn de eenvoudigste waarnemingen al voldoende om te laten zien dat het meestal andersom is! Bladeren, veren, een stuk papier stellen zich min of meer horizontaal in, dus *in de richting van grootste weerstand*. Daarnaast kan men merkwaardige schom-

melende bewegingen waarnemen van het blad, een draaiende beweging van het reepje papier (fig. 121).

Men kan de instellingsrichting van verschillende meetkundige lichamen goed bestuderen door ze in een rauwe aardappel of in ebbenhout uit te snijden en ze dan in een emmer water te laten vallen[1]; de draaiingen en schommelingen zijn dan veel minder storend. Beproef het met een plaatje en met een staafje. Aan een

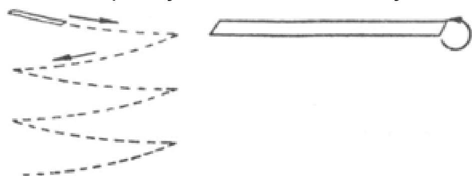


Fig. 121. Beweging van vallende voorwerpen. Links: zigzaglijn beschreven door een vallend blad papier. Rechts: snelle draaibeweging van een smal reepje papier.

uitgehold plaatje kan men goed zien dat de voorwerpen toch niet *altijd* de stand van grootste weerstand uitkiezen; want dit draait zich met de bolle zijde naar beneden, terwijl de weerstand groter zou zijn met de bolle zijde naar boven § 80. Ook sneeuwvlokken hebben ongeveer die vorm, en keren de bolle zijde naar beneden.

Deze waarnemingen en proeven zijn o.a. van belang voor de verklaring der optische verschijnselen die door ijskristalletjes in de dampkring veroorzaakt worden (**I** § 141-143). Plaatjes en naaldjes zullen hoofdzakelijk horizontaal vallen, als de lucht maar zeer rustig is. Ook tafelvormige combinaties van zuiltjes en plaatjes komen onder de ijskristalletjes voor; met onze aardappelmodelletjes vinden we dat het tafeltje waterpas, het daaraan vastzittend zuiltje loodrecht gaat staan, maar wat van de twee boven en wat onder komt hangt af van de verhouding der afmetingen.

Men zou zo gaarne aan de ijskristalletjes zelf waarnemen hoe ze zich bij hun zweefvlucht richten. Bij grote koude kan men soms de afzonderlijke plaatjes en sterretjes zien vallen, en neemt dan waar dat ze zich in zeer rustige lucht werkelijk waterpas instellen, terwijl ze bij wat meer luchtbeweging alle standen innemen.[2]

154. De windrichting.

Westenwind is wind *uit* het Westen. Van waar komt de wind vandaag? - De vraag lijkt eenvoudig, maar is het niet! Want de windrichting bij de begane grond is anders dan boven de daken

1) Hemel en Dampkring, **17**, 97, 1919.
2) Hemel en Dampkring, **6**, 139, 1908.

der huizen, en weer anders in de verschillende wolkenlagen.

1. De windrichting hier beneden bepalen we door ons zó te keren dat we de wind even sterk in onze beide oren horen gonzen en even sterk tegen de twee kanten van ons gelaat voelen blazen. Als hij uiterst zwak is, volgen we de beproefde methode: vinger natmaken, omhoog houden, en voelen aan welke kant hij het koudst wordt; of we steken een lucifer aan en zien naar waar de vlam waait; of we laten een vlokje watten aan een draad hangen en beoordelen hoe deze zich richt.
2. De windrichting boven de huizen moeten we afleiden uit de

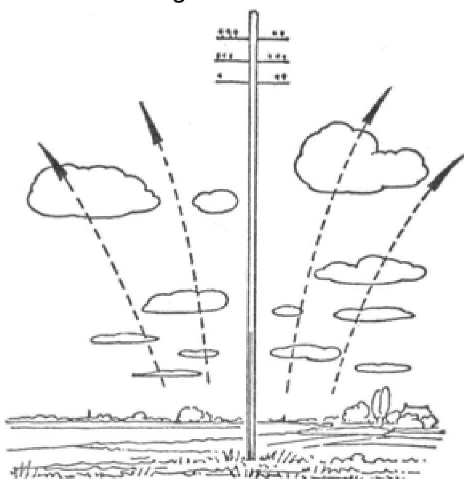


Fig. 122. De windrichting, bepaald uit de beweging der wolken.

stand van windvanen, wimpels en rookpluimen, mits ze tenminste 6 m hoog en niet al te ver van ons verwijderd zijn. Vermijd fouten tengevolge van perspektief! Windvanen in V-vorm zijn gevoeliger en komen na een stoot sneller tot rust dan de gewone enkelvoudige. Een lange wimpel (tenminste 1 m) is bijzonder doelmatig, omdat hij enigszins de gemiddelde richting aangeeft van de voortdurend wisselende windbeweging.
3. De richting waarin de wolken bewegen vinden we door ons zó te keren dat we de wolken vertikaal vóór ons zien opstijgen. Het nauwkeurigst gaat dat, door ons achter een telegraafpaal te stellen, zó dat we een punt van de wolk precies langs de paal zien lopen (fig. 122). De methode is zó gevoelig, dat men bij aandachtig kijken de richting van de wolkenelementen voortdurend kleine afwijkingen ziet ondergaan.
4. De richting waarin de hoge wolken bewegen is het best met de wolkenspiegel te bepalen (**II**, § 104). Doe de waarneming liever niet met wolkenribbels, waarvan we weten dat ze zich aan de grens tussen twee lagen vormen, en waarvan de snelheid dikwijls noch met de ene, noch met de andere laag overeenkomt.

Vergelijk dikwijls de windrichting hier beneden en de richting der wolken. Vooral in de nabijheid van lage druk-gebieden vindt u de afwijkingen altijd in *dezelfde* richting: *de waarnemer die naar de richting kijkt vanwaar de wind komt*, *ziet de wolken van rechts op zich aankomen*; hoe hoger

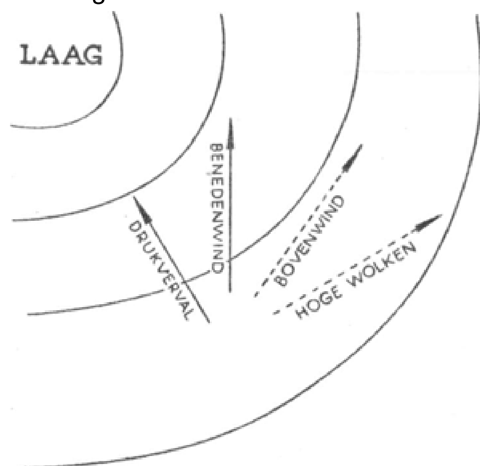


Fig. 123. De windrichting in de nabijheid van een lage druk-gebied, volgens de wet van Buys Ballot.

de wolken, hoe sterker 't verschil (fig. 123).

> Verklaring: in het algemeen waait de wind niet van de gebieden van hoge druk naar de gebieden van lage druk, maar hij wijkt af *naar zijn rechterzijde*: 'wet van Buys Ballot'. Oorzaak: de aswenteling der Aarde en de daaruit volgende versnelling van Coriolis. Hoe geringer de wrijving, hoe sterker die afwijking naar rechts wordt; ze is dus in hoge lagen van de dampkring nog uitgesprokener dan hier beneden. Hieruit volgt de hoger opgegeven regel.

Op zee is de windrichting te bepalen uit de richting waarin het schuim van de golven weggeblazen wordt of waarin de zeeën voortbewegen. Zeer dikwijls is dit een geheel andere richting dan die waaruit de deining loopt, opgelet dus! Vgl. § 93.

155. De windsnelheid.

'Snel als de wind ....' Hoe snel is dat eigenlijk? - Helemaal niet bijzonder snel! Let op dorre bladeren die door een windstoot meegenomen worden; natuurlijk bewegen ze iets trager dan de wind zelf, maar daar ze achtereenvolgens opwervelen overal waar de wind komt, is de ware windsnelheid licht te schatten: enkele meters per sekunde.

Of nog eenvoudiger: zoek een rechte weg die ongeveer in de richting van de wind loopt, en fiets nu met de wind mee. Als u langzaam fietst voelt u de wind van achter komen, als u snel fietst, van voren; bij een gemiddelde snelheid voelt u nu eens een zwakke windstoot in uw gezicht, dan tegen uw rug.

Bepaal nu uw snelheid: het is de snelheid van de wind. U heeft daarenboven zeer duidelijk gemerkt dat de wind altijd *onregelmatig* waait, en dat we alleen een *gemiddelde* snelheid kunnen aangeven. - De getallen die u aldus vindt zijn verrassend gering. De vraag is echter of de windsnelheid niet aanzienlijker zou zijn op grotere hoogte. Om te beginnen kunnen we de snelheid schatten van de rook die uit een fabriekschoorsteen komt. U weet dat u een hoek van ongeveer 20° kunt bepalen door de arm zover mogelijk uit te spreiden: de bedoelde hoek komt overeen met de afstand van top duim tot top pink (§ 2*b*). Stel u nu op een paar honderd meter van de fabrieksschoorsteen, en zo dat u hem ziet in een richting, nauwkeurig loodrecht op die van de heersende wind. U kunt dan vrij goed een of andere kenmerkende kronkel van de opstijgende rookzuil in het oog vatten, en opmerken hoeveel sekunden die kronkel nodig heeft om zich over 20° te verplaatsen. Stel t; de hoeksnelheid is dus $0,35/t$ radialen; en als A de afstand is van Uw oog tot aan de schoorsteen, is de lineaire snelheid van de rook $0,35A/t$.

We kunnen echter ook de snelheid van de wind op wolkenhoogte bepalen! - Op een dag dat er mooie, afzonderlijke wolken zijn in blauwe lucht, kunnen we de wolkenschaduwen prachtig zien lopen over het wijde land. Het mooist gaat dit in uitgestrekte zandstuivingen of weilanden, waar men soms hele wolkenlandschappen in de schaduwen terugvindt; maar ook midden in de stad, in een straat die evenwijdig aan de windrichting is, hebben we gelegenheid de wolkenschaduwen te volgen. Let op hoeveel sekunden ze nodig hebben om een gegeven afstand te doorlopen, bepaal die, bereken de snelheid per sekunde. Omdat de zon zo héél ver weg is, kunnen we rustig zeggen dat de snelheid der wolkenschaduwen praktisch gelijk is aan die der wolken zelf. - We vinden dat de snelheid van de wolken altijd veel groter is dan die van de wind hier beneden. Oorzaak: *de wrijving van de wind tegen de aarde*. Op zee is die wrijving gering en de wind dus sterk. In bossen is de wrijving groot en de lucht windstil.[1)]

Als u in de trein bent, op een recht stuk van de baan dat ongeveer evenwijdig aan de windrichting is, moet u eens een blikrichting scherp bepalen door langs twee staven van de coupé

1) De snelheid der wolken is ook indirekt te bepalen uit een schatting der hoogte en een meting van de hoeksnelheid met de wolkenspiegel (II, § 104).

te mikken, of langs een staaf en een vensterkruis. Verplaatst die viseerlijn zich ten opzichte van de wolken? Meestal haalt ze hen in; hun snelheid is dus kleiner dan de 25 m/sec die de trein ongeveer aflegt. Let op hoe het tafereel verandert zodra de trein stopt!

't Is helderblauwe locht, *geweerd de wolkendriften*, *die*, *varend voor den wind*,
uit onzen hemel schijften; *terwijl*, *benedenwaart*, *op huis en vore en veld*, *hun*
duister schaduwbeeld, *onvatbaar*, *henensnelt*.
G. Gezelle, *Rijmsnoer*, *VIII* (*Storme*).

156. Een schaal voor de windsnelheid.

Sedert vele jaren hebben de zeelui en de meteorologen zich geoefend in het schatten van windsnelheden zonder enig instrument, eenvoudig uit de uitwerkingen van de wind die we om ons heen waarnemen. De Engelse admiraal *Beaufort*, in 1805, bepaalde de graden van de naar hem genoemde schaal volgens de snelheid en de takelage van een fregatschip bij verschillende windsterkten. Men gebruikt de ‘schaal van Beaufort’ in die betekenis niet meer; de graden zijn nu als volgt bepaald.

0	0- 0,5 m/sec *windstilte*, rook stijgt vertikaal op.
1	0,6- 1,7 m/sec *flauw en stil*, rook vormt een mooie bocht, de windvanen draaien nog niet.
2	1,8- 3,3 m/sec *flauwe koelte*, bladeren bewegen, men voelt de wind in 't gelaat, de windvanen wijzen de wind aan.
3	3,4- 5,2 m/sec *lichte koelte*, twijgen bewegen, een wimpel waait uit.
4	5,3- 7,4 m/sec *matige koelte*, wervelt stof en papier op, doet kleine takken bewegen.
5	7,5- 9,8 m/sec *frisse bries*, beweegt bebladerde takken.
6	9,9-12,4 m/sec *stijve bries*, beweegt grote takken; het gebruik van een paraplu wordt moeilijk; de wind fluit in de telegraafdraden.
7	12,5-15,2 m/sec *harde wind*, kleine bomen bewegen; schuimkopjes op de binnenwateren.
8	15,3-18,2 m/sec *stormachtig*, beweegt grote bomen, belet u vooruit te komen; twijgen breken af.
9	18,3-21,5 m/sec *storm*, lichte schade: dakpannen worden afgerukt.

10	21,6-25,1 m/sec *zware storm*, ontwortelt bomen, zware schade.
11	25,2-29,0 m/sec *zeer zware storm* Algemene, zware schade. Sterktegraad 12 komt in een bepaald station slechts een paar malen per eeuw voor.
12	*orkaan* Algemene, zware schade. Sterktegraad 12 komt in een bepaald station slechts een paar malen per eeuw voor.

Deze windsnelheid geldt voor een hoogte van 6 meter, dichter bij het aardoppervlak is ze op hetzelfde ogenblik veel kleiner. Het toenemen met de hoogte *h* is ongeveer te beschrijven door een wet van de vorm $v = v_1 h^{0.30}$, waarbij v_1 de snelheid op 1 m hoogte voorstelt; op 6 m hoogte is de wind tweemaal sneller dan op 1 m, op 30 m driemaal sneller. Deze wet hangt natuurlijk samen met de wrijving, dus met de begroeiing en de oneffenheden van het terrein. In hogere lagen neemt de exponent van *h* geleidelijk af tot 0,06. - Dikwijls kan men waarnemen, hoe een vogel betrekkelijk moeilijk opvliegt, tot hij een hoogte van enige meters bereikt heeft, en dan plotseling steil opstijgt in de sterkere wind die op die hoogte waait.

Om de betekenis der graden van de Beaufortschaal te onthouden, kunnen we 't formuletje gebruiken: snelheid in

$$\mathrm{m/sec} = x\left(1 + \frac{x}{7}\right)$$

; *x* is de graad van de Beaufortschaal. Nog eenvoudiger is te onthouden, dat de opeenvolgende graden ongeveer overeenkomen met de reeks der oneven getallen.

De windsterkte aan boord van een zeeschip moet afgeleid worden uit de wisselende vormen van het zee-oppervlak zelf; verschijnselen aan boord van het schip zijn minder bruikbaar, daar de snelheid van het schip zich dan samenstelt met die van de wind. Door lange oefening heeft de zeeman een grote zekerheid verkregen in het schatten van de ware windsterkte. De volgende tabel geeft enigszins weer waarop men te letten heeft (schaal van Petersen); de graden en de snelheden komen overeen met de schaal die voor het land geldt.

- **0** Spiegelgladde zee.
- **1** Er vormen zich kleine, schubvormige golven, maar geen schuimkammen.
- **2** } De golven zijn kort en duidelijker gevormd; hun kammen beginnen te breken; het schuim ziet er niet wit, maar glasachtig uit.
- **3** } De golven zijn kort en duidelijker gevormd; hun kammen beginnen te breken; het schuim ziet er niet wit, maar glasachtig uit.
- **4** De golven worden langer; er vormen zich op vele plaatsen witte schuimkoppen. De zeeën die breken veroorzaken een kort geruis.
- **5** De golven krijgen een duidelijke lange vorm; overal vormen zich witte schuimkammen, waarvan het schuim hier en

daar opwaait. Het breken der zee veroorzaakt een sterk geruis en klinkt voortdurend.

6 Grotere golfbergen beginnen zich te vormen, de witte schuimplekken beslaan een groter oppervlakte; opwaaiend schuim komt veelvuldig voor. Het breken der zee geeft meer een dof, rollend geraas.

7 De zee verheft zich in grotere massa's tegelijk, en het witte schuim dat zich bij 't breken vormt waait in de wind tot strepen uit. Het geraas der brekende zee wordt sterker en rommelend.

8 } De hoogte der golfbergen en de kamlengte nemen zienderogen toe; het schuim legt zich in dichte strepen volgens de windrichting. Het 'rollen' der zee begint.

9 } De hoogte der golfbergen en de kamlengte nemen zienderogen toe; het schuim legt zich in dichte strepen volgens de windrichting. Het 'rollen' der zee begint.

10 Er vormen zich hoge golfbergen met lange kammen die breken. Het zee-oppervlak gaat er over 't geheel wit uitzien. Het rollen der zee wordt sterk en gaat met stoten. Het zicht is door verwaaid schuim verminderd.

11 } De golfbergen worden zo hoog, dat twee schepen elkaar af en toe uit het gezicht verliezen als ze in de diepe dalen naar beneden gaan. Het rollen der zee wordt gebulder; zij is geheel bedekt met wit schuim dat in strepen volgens de windrichting uitwaait; door het geweld van de wind wordt de lucht zozeer met fijne druppeltjes gevuldf, dat men niets meer in de verte ziet.

12 } De golfbergen worden zo hoog, dat twee schepen elkaar af en toe uit het gezicht verliezen als ze in de diepe dalen naar beneden gaan. Het rollen der zee wordt gebulder; zij is geheel bedekt met wit schuim dat in strepen volgens de windrichting uitwaait; door het geweld van de wind wordt de lucht zozeer met fijne druppeltjes gevuld, dat men niets meer in de verte ziet.

Op een zelfde ogenblik is de windsnelheid dicht boven een groot wateroppervlak ruim de helft groter dan over het land, een gevolg van de geringere wrijving -. Ook hier neemt de wind in de eerste meters snel met de hoogte toe; bijvoorbeeld:

	boven land	**boven water**
1 m hoogte	2,5 m/sec	4 m/sec
2 m hoogte	3,0	5
4 m hoogte	3,9	6
6 m hoogte	4,9	6,4

Denk niet, dat de graden der windsterkteschaal geheel en al gekenmerkt worden door de windsnelheid in m/sec. Bij iedere graad behoort een eigenaardige toestand van de lucht en van het landschap, die zo goed mogelijk is uitgedrukt in de sobere beschrijving.

Verder bemerke men, dat deze schaal feitelijk niet alleen de snelheid van de wind meet, maar wellicht nog meer zijn *onbestendigheid*; deze neemt gemiddeld met de windsterkte toe. Bij een gegeven gemiddelde snelheid *v* variëert de feitelijke snelheid meestal tussen 0,2 *v* en 2*v*.

157. Verwoestingen door orkanenen aangericht.

De schade, bij storm aangericht, kan een denkbeeld geven van de grootste windsterkte die geheerst heeft. Een felle wind van snelheid *v* m/sec oefent ongeveer een druk uit van 0,08 v^2 kg/m^2. Een muur waarvan de hoogte *h* is en de dikte *d*, wordt omvergeblazen bij een windsnelheid

$$v = \frac{100d}{h}\sqrt{3(1 + h)}$$

(alles in meters en meters per sekunde). Het zijn vooral de vlagen en windstoten die schade teweegbrengen.

Merkwaardig is het, hoe na een orkaan soms in een heel woud slechts enkele sparren ontworteld zijn. Waarom juist die en niet andere? De wind waait met onregelmatige stoten, maar iedere boomstam heeft zijn eigen trillingstijd (§ 59), en al die stammen trillen dus in zeer verschillende mate met de wind mee. Die welke toevallig een trillingstijd hebben welke overeenkomt met de gemiddelde periode der windstoten, zullen het sterkst meetrillen en het eerst omvallen. Daarenboven is gebleken dat de grootste windsnelheden slechts over gebieden van enkele tientallen meters voorkomen.

158. Windsterkte en richting aan boord van een schip.

De windsterkte die men aan dek voelt is van punt tot punt verschillend. De beste indruk van de gemiddelde windsterkte krijgt men direkt achter de boeg; elders is de snelheid meestal te klein, op de brug is ze te groot. Men kan die snelheid schatten volgens de drukking die we van de wind voelen, of die met een anemometer bepalen.

Dit is echter slechts *de schijnbare snelheid S*, resultante van

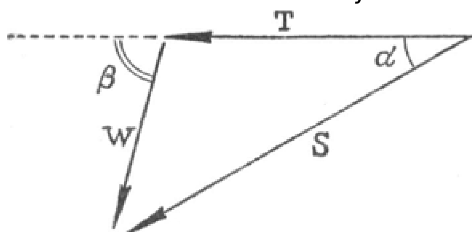


Fig. 124.

de ware wind *W* en de 'tegenwind' *T* van het bewegende schip (§ 19). Nu volgen enkele manieren om de ware wind te vinden.

1. Schat de snelheid van het schip uit het bestek van de vorige dag vergeleken met dat van vandaag; of vraag een der officieren; tegengesteld daaraan is de tegenwind *T*. Bepaal de hoek *α* tussen de rookpluim *S* en de as van het schip (naar de achtersteven toe). Het is verbazend hoe stand-

vastig men de rookpluim onveranderlijk in dezelfde richting ziet wijzen, als men haar in gedachte verlengt tot ze de gezichteinder ontmoet. Uit *T*, *α*, *S* is *W* op te lossen, het eenvoudigst door tekenen op schaal (fig. 124).

2. Schat de snelheid van het schip, dus de tegenwind *T*. Bepaal de hoek rookpluim-asrichting (*α*), en de hoek ware windasrichting (*β*). Deze laatste hoek is af te leiden uit de richting waarin het schuim der brekende golven wegstuift, of juister uit de voortplantingsrichting der zeeën. Uit *T*, *α*, *β* is *W* op te lossen.
3. Uit *S*, *α*, *β* die we reeds bepaald hebben, volgt ook *W*.
4. De meest gebruikte methode is het rechtstreeks bepalen van de ware windsterkte door het beoordelen van het zeeoppervlak volgens de Beaufortschaal.

159. Het meten der windsnelheid met de katathermometer.

Ik heb lang gezocht naar een eenvoudig toestel, dat zou toelaten de windsnelheid objektief te meten. Telkens bleek, dat de onophoudelijke snelheidsveranderingen en de wisselvalligheid van de luchtbeweging een onoverkomelijke hinderpaal vormden. Het is duidelijk dat we een instrument moeten hebben dat over een niet te korte tijd optelt en dat aldus de *gemiddelde* windsnelheid levert, zoals de windmeter van Robinson dat voor de vakmeteorologen doet.

De *katathermometer* bleek mij tenslotte de gewenste oplossing te geven.[1] We gebruiken een gewone alkoholthermometer met groot reservoir, die we tot 50° C verwarmen, en in de wind laten afkoelen tot het verschil met de luchttemperatuur op ⅔ van het aanvankelijke teruggebracht is. De tijd, nodig voor het afkoelen, is een goede maat voor de windsnelheid.

Het verwarmen geschiedt gemakkelijk met heet water in een thermosfles; zodra de thermometer 65° C bereikt heeft, drogen we hem snel af en houden hem op het punt waar we de windsnelheid willen bepalen, terwijl we onmiddellijk sekunden beginnen te tellen op het ogenblik dat de dalende kwikzuil het getal 50 passeert. Stel dat de luchttemperatuur *t* is, dan wachten we dus volgens onze afspraak tot de thermometer de temperatuur *x* bereikt heeft, gegeven door:

$$\frac{x - t}{50 - t} = \frac{2}{3}$$

, ofwel

$$x = 33 + \frac{t}{3}$$

.

1) Vgl. II, § 90, dat hier in grote trekken is overgenomen.

De bepaling van de afkoelingstijd *T* kan nog gemakkelijker geschieden met de thans zo goedkope stophorloges.

We moeten onze windmeter eens en vooral ijken. Dit geschiedt voor windsnelheden tot 5 m/sec door op de fiets te springen, de thermometer voor u uit houdend, en met bekende snelheid

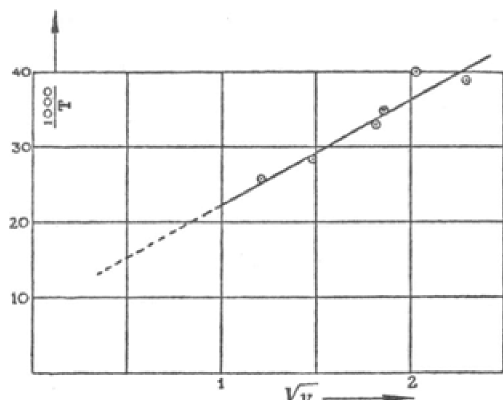


Fig. 125. Het meten der windsnelheid met de katathermometer: verband tussen de afkoelingstijd *T* en de windsnelheid *v*. (Deze lijn is voor elke thermometer verschillend).

te rijden. Voor grotere snelheden neemt u hem op een auto mede, zorg dragend hem ver zijdelings uit te steken. Maak een grafische voorstelling van 1000/*T* tegen √*v*. U vindt een lijn die bij benadering recht is, en die nu verder kan dienen om uit elke bepaling van de afkoelingssnelheid de onbekende *v* af te lezen (fig. 125).

> Bepaal aldus de windsnelheid op verschillende hoogten (groot verschil tussen 0 en 2 m; verder hoge ladder, uitzichtstoren, kerktoren).
> Bepaal de windsnelheid in verschillende plantengemeenschappen, op verschillende afstanden van een bos.

160. Het oplaten van een loodsballonnetje.

Met een ballonnetje zoals dat wat we gebruikt hebben voor de studie van de luchtweerstand, kunnen we de hogere luchtlagen verkennen, aldus op eenvoudige wijze nabootsend wat de meteorologen dagelijks met veel volmaaktere instrumenten uitvoeren. We bepalen zijn stijgkracht; ook meten we zijn omtrek, en berekenen daaruit het oppervlak zijner doorsnede (§ 148).

Als we nu ons ballonnetje loslaten, zal het stijgen met een snelheid die we uit onze vorige proeven reeds kennen (zie de formule blz. 208!). Tevens neemt de wind het mee in horizontale richting, maar zonder een merkbare invloed te hebben op zijn vertikale stijgkracht *v*; de twee bewegingen gebeuren dus onafhankelijk van elkaar. Als we na een tijd *t* het ballonnetje in een richting zien die een hoek ϑ met de horizon maakt, kunnen we dus berekenen op welke hoogte $h = vt$ het zich bevond, en op welke horizontale afstand h cot ϑ het van ons verwijderd is.

Om het ballonnetje te kunnen volgen, bevestigen we met 4 flinke spijkers een toneelkijker op een plankje, zo dat de as van de kijker nauwkeurig evenwijdig aan de rand van het plankje

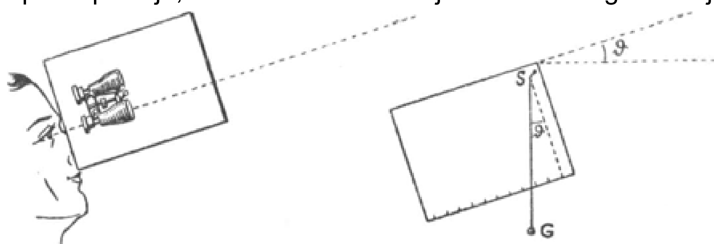


Fig. 126. Het volgen van een loodsballonnetje.

gericht is (fig. 126). Aan de achterkant hangt een draadje aan een spijker S, bezwaard met een gewichtje G en als schietlood dienend. De stand van het plankje t.o.v. dit schietlood is af te lezen aan een cm-schaal onderaan, en daaruit is de hoek boven de horizon onmiddellijk te vinden (vgl. § 2, *i*). Als de toneelkijker op de gezichteinder gericht is, moet het schietlood bij schaaldeel 0 hangen. - Wie geen toneelkijker heeft, gebruikt het plankje zelf en viseert langs de rand.

Als we nu nog een horloge met sekundenwijzer bij de hand hebben, is al het nodige voor onze proef klaar. We begeven ons op een punt met vrij uitzicht aan de kant naar waar de wind waait, vergezeld van een kameraad die de aflezingen zal doen en alles zal optekenen.

Opgelet! Nu! - Het ballonnetje wordt precies bij 't begin van een minuut losgelaten, de een volgt het in de kijker, de ander leest telkens na een halve of hele minuut de stand van het schietlood af, en schrijft op. O, wat is dat bolletje gauw kleiner en kleiner geworden, nu slechts een kleine donkere stip tegen de lucht! Verlies het niet uit het gezicht, of u vindt het

niet meer terug! Ineens verdwijnt het op een gegeven ogenblik in een wolkenlaag; of als er geen wolken zijn wordt het zo klein dat we 't niet meer volgen kunnen. We kunnen nog een tweede proef nemen met een dergelijk ballonnetje waaruit we eerst wat gas hebben laten ontsnappen door het buisje onder aan de ballon voorzichtig even open te maken.

Zeer treffend in ons geval (en bijna altijd) is, *dat de hoogtehoek voortdurend afneemt* gedurende elke proef; dat bewijst natuurlijk dat de windsnelheid groter wordt naarmate men hoger komt. Verder kunnen we onmiddellijk de hoogte van de wolkenlaag vinden. U merkt ook op, dat de tweede proef langzamer verloopt dan de eerste; het duurt veel langer eer het ballonnetje de wolkenlaag bereikt, en in die tijd is het verder door de wind meegevoerd, wat uit de geringere hoogtehoeken blijkt. Tenslotte berekenen we de gehele baan, door onze gegevens stelselmatig te bewerken op de wijze die men uit het volgende, aan de werkelijkheid ontleende voorbeeld kan zien. In dit geval steeg het ballonnetje, naar wij volgens blz. 208 berekenen, met een snelheid van 1,55 m per sekunde of van 93 m per minuut.

Tijd *t*	**tg □**	**hoogte *h* = 93 m × *t***	**horizontale afstand**	**windsnelheid**
0 min.		0	0	
0,5	0,561	46 m	82 m	2,7 m/sec
1,5	515	93	181	3,3
1,5	458	139	303	4,1
2	426	185	434	4,4
2,5	406	231	570	4,5
3	380	277	730	5,3
3,5	352	324	920	6,3
4	348	370	1060	4,8
4,5	335	416	1240	6,0
5	316	463	1460	7,3
5 min 10 sec	verdwenen	477	1600	

We kunnen de baan in een vertikaal vlak tekenen (fig. 127); bij de tamelijk geringe hoogten waarover we het ballonnetje kunnen volgen, is het meestal niet nodig rekening te houden met veranderingen in azimuth[1]. Als alles goed is uitgevoerd,

1) Grote veranderingen kunnen worden gevonden door elke halve minuut ook de windstreek te schatten waarin men het ballonnetje ziet. Hierbij een kompasje gebruiken.

stemmen de resultaten van onze twee proeven heel netjes overeen, mits de abscissenas voor het tweede figuurtje in de verhouding der stijgsnelheden veranderd wordt. Let op het toenemen der windsnelheid met de hoogte!

Herhaal de proef op een mooie dag 's ochtends en 's avonds. 's Ochtends is het toenemen der snelheid met de hoogte veelal uitgesprokener, 's namiddags geringer.

Dergelijke ballonnetjes kunnen voorzien worden van een briefkaart met verzoek tot terugzending. In een bepaald geval

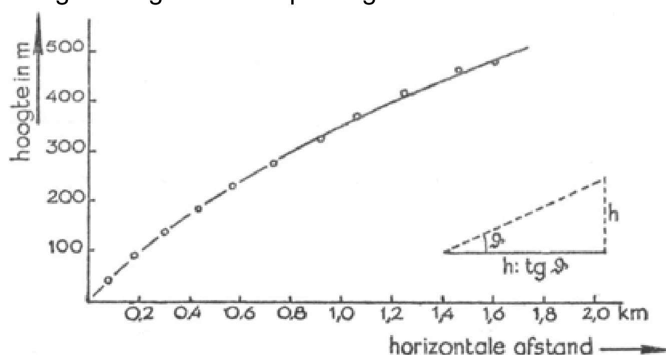


Fig. 127. De baan van een loodsballonnetje, met eenvoudige middelen bepaald.

was een eenvoudig kinderballonnetje in Zuid-Frankrijk terecht gekomen, na 430 km te hebben afgelegd. Een andere maal werd een dergelijk ballonnetje uit England in Zuid-Afrika teruggevonden! Meestal blijven ze slechts een half uur of een uur zwevende; hun snelheid is van de orde 60 tot 100 km/uur.

161. De invloed van de plantengroei op de wind.[2]

In een dennebos neemt de wind niet op de normale manier met de hoogte toe; hij is vrijwel even zwak op elke hoogte (bv. 1 m/sec), tot wij boven de boomkruinen uitkomen, waar de windsnelheid snel toeneemt (fig. 128). Blijkbaar zijn er hier twee grensoppervlakken die een rol spelen, de grond en de boomkruinen.
[1]

2) R. Geiger, Das Klima der bodennahen Luftschicht (Vieweg, 1927).
1) A. Bracke, A la recherche des courants d'air (Mons, 1907). - Qu.J. **63**, 148, 1937.

Schat de sterkte van de wind in Beaufortschaal vlak achter

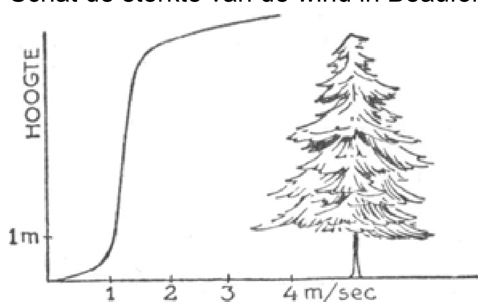


Fig. 128. De windsnelheid op verschillende hoogte in een dennebos.

een bos, in de ‘windschaduw’; dan 25 m verder; 50 m achter het bos is de windsterkte nog wel één graad zwakker dan in 't vrije veld; op 100 m is de invloed nog te merken, op 500 m is hij verdwenen. De invloed van een groep bomen is nog merkbaar op 6 tot 8 maal hun hoogte.

Onderzoek bij stormwind de luchtstromingen in een open plek van het bos; dorre bladeren zijn voldoende om de bewegingsrichting na te gaan. Men vindt dat er zich een echte wervel gevormd heeft (fig. 129). - In een brandstrook waait de wind praktisch altijd in de richting van die strook, het sterkst is hij



Fig. 129. Windwervel in een open plek van het bos.

aan de rand naar dewelke de buitenwind waait. Staat de buitenwind toevallig precies loodrecht op de brandstrook, dan voelt men onregelmatige windstoten evenwijdig aan de strook, maar in beide richtingen.[1)]

Leg u in de stormwind tussen de hoge heidestruiken en druk u goed tegen de grond: u voelt bijna geen wind. Door metingen vond men in een bepaald geval voor de windsterkte in de heide:

1) R. Geiger, Bioklim. Beiblätter, **1**, 134, 1934.

op 2 cm hoogte	0,01 m/sec
10 cm hoogte	1 m/sec
50 cm hoogte	3,7 m/sec
180 cm hoogte	9,3 m/sec.

Binnen een afstand van een paar meter heerst dus een enorm *klimaatverschil!* We stellen ons niet voldoende voor, hoe anders het klimaat is voor een grashalmpje, voor een kevertje, dan voor de mens. De studie van het 'mikroklimaat' is van het grootste belang voor landbouw en biologie.

Op Texel heeft men de weiden van elkaar gescheiden door lage dijkjes; deze geringe verhevenheidjes zijn voldoende om de snelheid van de wind die over de grond strijkt tot ⅓ terug te brengen van wat ze in een open vlakte is.

162. Dorre bladeren.

De herfst is de tijd bij uitnemendheid om luchtstromingen te bestuderen; de droge bladeren die met miljoenen overal langs de wegen dwarrelen, zijn heel gevoelige windaanwijzers.

Bij elke greppel, bij elke ook zelfs heel geringe inzinking van het terrein, - al is het maar een golving van *een paar centimeter* diepte! - hopen de dorre blaren zich op. Op zulke punten moet de wind dus merkbaar minder sterk zijn. Andere opeenhopingen ontstaan waar de luchtstroom plaatselijk opstijgt, zodat de

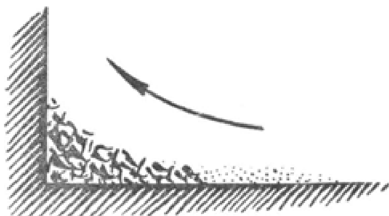


Fig. 130. Zand en dorre bladeren, door de wind opeengehoopt tegen een muur.

horizontale componente van de luchtbeweging klein wordt. Zo vindt men soms in de inspringende hoek van een gebouw een grote hoop bladeren, die ontstaat doordat de lucht daar dwarrelend opstijgt. En let maar eens op de zoom van bladeren die in de herfst langs elke stoep, langs elke muur te vinden is: naarmate de wind dichter bij de muur komt wordt zijn horizontale snelheidscomponente geringer, en zetten zich eerst het zand af, daarna pas de dorre bladeren (fig. 130). Soms vormen de dorre blaren voor een stoep zulk een grote hoop, dat telkens weer een der bovenste door de luchtstroom meegenomen wordt en op de stoep wipt. Aan de noordzijde van een plein kan men bij sterke zuidenwind de blaren over de hele

hoogte van een huis zien opstijgen, meegevoerd door de opstijgende stroom.

Als een auto voorbijkomt, dwarrelen de dorre bladeren nog ongeveer 5 sekunden; in die tijd heeft hij misschien 80 meter afgelegd. Nu moeten we ons goed voorstellen dat de wervelingen en stromingen achter zulk een auto, die al lang zijn zelfde snelheid heeft, onveranderlijk met hem meelopen; er is dus een reusachtig groot wervelpatroon dat hem vergezelt en overal de lucht achter hem in roering brengt. Nog veel uitgebreider is dit achter een sneltrein, waarvan de wind nog na 9 sekunden de blaren doet dwarrelen: het wervelpatroon strekt zich hier dus over een lengte van wel 180 m achter de trein uit!

Een aantal bijzonderheden die we hier voor dorre blaren beschrijven zijn nog mooier waar te nemen aan de miljoenen fijne bruine schubbetjes die midden Mei de grond bedekken, overal waar er veel beukebomen staan; ze zijn afkomstig van de knoppen die pas zijn opengegaan.

163. Stuwing van de wind om hoge gebouwen.

Iedereen weet hoe hard het waaien kan nabij kerken en torens, vooral als die aan een open plein staan. Om die grote gebouwen te vermijden moeten de windbanen uitwijken, en zo worden zij in een kleine ruimte samengedrongen; dientengevolge moet de stromingssnelheid daar toenemen. Dikwijls vormen zich daarbij wervels (§ 120). - Te Groningen zegt men: ‘Als het tussen beide markten niet regent *en bij de Aa-kerk niet waait*, dan is het mooi weer.’

Prachtig ziet men aan het strand de stuwing van de lucht tegen de dijk en tegen de eerste duinenrij. De sterke opstijgende wind loopt in zilveren golven over de helm van de duinhelling. Meeuwen zweven uren lang in de opstijgende stroom, nauwelijks af en toe eens met de vleugels slaande.

164. De wind in de schoorsteen.[1)]

De wind die over de monding van een schoorsteen strijkt, *zuigt* de verbindingsgassen naar buiten door een aerodynamisch meeslepingseffekt (zoals bij de verstuiver van een kapper). Als de wind schuin naar beneden blaast, wordt de zuigkracht der

1) Rayleigh, Met. Mag. **17**, 130, 1882.

horizontale componente tegengewerkt door de benedenwaartse componente; men bewijst dat ze elkaar net opheffen als de

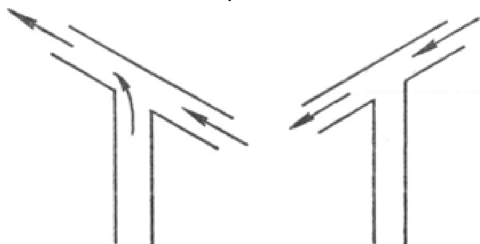


Fig. 131. Opzuigen van de rookgassen door de wind die over de schoorsteen strijkt. Links: maximale zuigkracht. Rechts: zuigkracht net opgeheven.

windstroom onder 30° naar beneden gericht is (fig. 131). De maximale zuigkracht ontstaat als de wind onder 30° naar boven blaast. Met een loodrecht T-stuk boven de schoorsteen is de zuigkracht praktisch alleen werkzaam en de kans op inslaan zeer gering.

165. Invloed van de wind op het waterpeil.

Franklin vertelt[1], dat een vijver, 3 mijl lang en 0,90 m diep, door een stormwind aan de ene kant geheel en al drooggelegd werd, terwijl het water aan de andere zijde 1,80 m diep was geworden. Heeft u ooit iets dergelijks kunnen waarnemen? -

In de jaren '90 is het voorgekomen, bij een aanhoudende felle storm, dat het Winschoterdiep vrijwel droogwaaide van de sluis te Zuidbroek tot aan de Kromme Rakken, over een afstand van ruim 2 km! Er bleef zo weinig water over, dat de jeugd naar allerlei voorwerpen in de modder aan 't zoeken was.[2] - Met de nauwkeurige peilschalen van de Waterstaat heeft men gevonden dat het oppervlak der Noordzee *schuin* gaat staan door de wrijving die de wind op het zee-oppervlak uitoefent. - Toen de afsluitdijk nog niet gereed was, kon men te Durgerdam, aan het buiten-Y, waarnemen dat het water bij felle Noordenwind soms tot 2 m hoger dan normaal stond, terwijl het bij harde Westenwind evenveel zakte, zodat botters die buiten voor anker waren gegaan op het droge kwamen te liggen. In de Oranjesluizen werd dan niet meer geschut, omdat er zelfs in de vaargeul te weinig water stond.[3]

1) Vgl. Arago, Oeuvres, **9**, 55.
2) Medegedeeld door den Heer H.J.R. Smith.
3) Medegedeeld door den Heer Drs. E.T. Steller.

166. Vlieger.[1]

Verschillende modellen zijn hieronder getekend (fig. 132); houten latjes zijn door een dubbele lijn aangegeven, touwen door

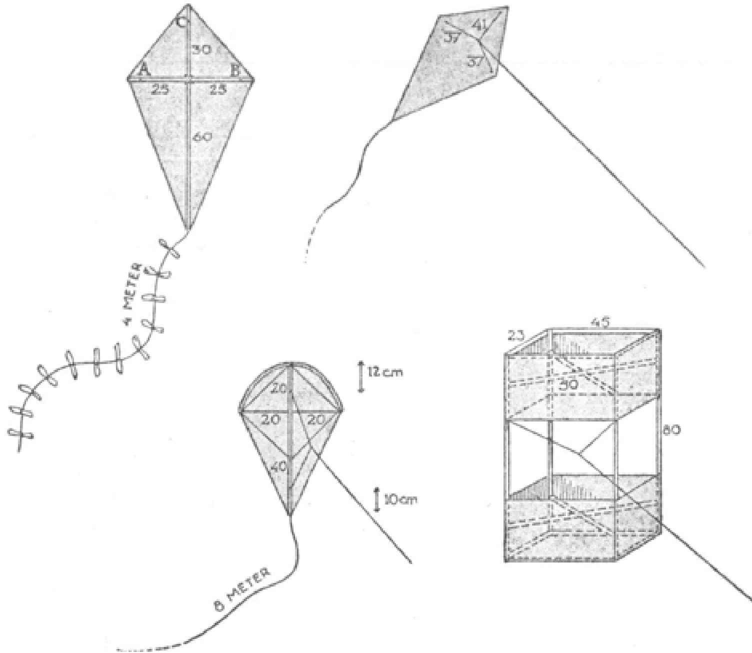


Fig. 132. Verschillende modellen van vliegers.

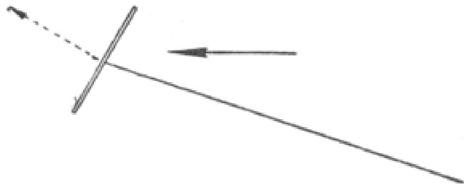


Fig. 133. Hoe de winddruk een vlieger doet opstijgen.

een enkele, gearceerd is wat met papier of linnen bedekt wordt.

De vlieger verheft zich in de lucht, als de winddruk er *een schuin opwaarts gerichte componente* op uitoefent; daartoe is de eis, dat de vlieger zich schuin ten opzichte van de wind instelt op de wijze van fig. 133.

1) Vgl. bv. E.R. Downing, a Guide in Physical Nature-Study (Chicago, 1919), blz. 32.

Deze instelling wordt verkregen, hetzij door het aanbrengen van een staart, hetzij door te maken dat het ondereind van de vlieger zwaarder is dan het boveneind, dus door het aanbrengen van het touw boven het midden.

Ten onrechte denken velen, dat het doek of papier van een vlieger strak gespannen moet zijn. Het tegendeel is waar! Een vlieger waarvan het draagvlak zo los is, dat het zich door de winddruk welven kan, stijgt hoger, en het touw is steiler opwaarts gericht. Bij een goede vlieger stelt het touw zich vrijwel *vertikaal* in! Zo groot is de dwarse stijgkracht die de wind ontwikkelt; terwijl hij helemaal geen neiging vertoont, de holle vleugel in zijn eigen bewegingsrichting te verplaatsen.

Voor *modelvliegtuigen* verwijs ik naar: H. Hahn, Physikalische Freihandversuche, **2**, 372 en vlg. (Berlin, 1916). - V.E.R. Alberts, Modelvliegtuigen Bouwen (Amsterdam, Ahrend, 1935). - W. van Pelt, Proefvliegtuigen (Amsterdam, Ahrend).

167. Windmolens en windraderen.[1]

Waarom heeft een windmolen altijd 4 vleugels en nooit 8? Zou zijn vermogen dan niet verdubbelen? Zijn de moderne Amerikaanse windraderen met hun groot aantal vleugels niet doelmatiger gebouwd?

De windmolen onttrekt energie aan de wind en gebruikt die voor het overwinnen van wrijvingen bij het malen. Dat onttrekken van energie komt daarop neer, dat de wind, die met een snelheid v_1 tegen de wieken blaast, achter de wieken met een kleinere snelheid v_2 wegstroomt. Als we de cirkel die door de wieken beschreven wordt met een toenemend aantal wieken vullen, en die wieken toenemend groot maken, zal aanvankelijk het vermogen van de molen stellig toenemen; maar weldra komt er een grens: er wordt wel veel snelheid aan de wind onttrokken, maar er wordt nu zó weinig lucht doorgelaten dat de molen bijna stil valt. - Waar is het optimum? Men bewijst gemakkelijk[1] dat de vulling door de vleugels zó moet zijn dat $v_2 = v_1/3$ (1)

Want de arbeid die per sekunde aan de wind onttrokken wordt is $½mv_1^2-½mv_2^2$, waarbij m de hoeveelheid lucht is die per sekunde doorstroomt; m is evenredig met de doorstroomsnelheid, waarvan men aantoont dat ze het gemiddelde is van v_1 en v_2. Het vermogen is dus evenredig met

$$\frac{v_1 + v_2}{2} (v_1^2 - v_2^2)$$

, welk produkt de grootst mogelijke waarde heeft voor $v_2 = v_1/3$.

1) Kort overzicht in: Naturwiss. **15**, 905, 1927. - Het Prinsenmolenboek (Wageningen, 1942).
1) Kort overzicht in: Naturwiss. **15**, 905, 1927. - Het Prinsenmolenboek (Wageningen, 1942).

Nu neemt de remming *r* die de wieken op de wind uitoefenen niet alleen toe als hun oppervlak *f* meer en meer vult van het totale oppervlak *F* dat bij de beweging bestreken wordt, maar ook als hun lineaire snelheid *u* ten opzichte van de windsnelheid *v* toeneemt; en wel is ongeveer

$$r = c \,.\, \frac{f}{F} \,.\, \left(\frac{u}{v}\right)^2$$

, waarin *c* een constante is. Willen we dus de wind voldoende remmen om te voldoen aan de voorwaarde (1), dan moet *r* een zeer bepaald bedrag hebben, en dan ziet men

$$\frac{f}{F} = \text{const.} \left(\frac{v}{u}\right)^2$$

. *Hoe sneller de molen draait, hoe kleiner de vullingsgraad moet zijn.* (2)

Schat nu eens de (lineaire) snelheid der wieken van een ouderwetse windmolen en van een Amerikaans windrad! Natuurlijk is die snelheid klein voor punten dicht bij de as, maar ze neemt toe voor punten die verder van de as verwijderd zijn; de vullingsgraad neemt tegelijk daarmee naar buiten af. Om de gedachten te bepalen beschouwen we een punt van de omtrek. We vinden nu bv. voor een windmolen: 10 m/sec en voor een windrad 4 m/sec; de vullingsgraden moeten zich nu verhouden als $(4/10)^2$ of 16/100. Het is dus volmaakt begrijpelijk dat de windmolen veel minder vleugels heeft dan het windrad!

Schat empirisch de waarde der constante in formule (2), zowel voor het windrad als voor de windmolen, uitgaande van de gemiddelde windsterkte waarbij de molen gebruikt wordt.

Wat is het vermogen dat een molen kan leveren? Door het bestreken oppervlak *F* stroomt per sekunde een hoeveelheid lucht *vF*, die γ kg per m^3 weegt en een arbeidsvermogen van beweging

$$\frac{\gamma}{2g} v$$

heeft. De molen kan dus in beginsel per sekunde beschikken over

$$vF.\ \frac{\gamma}{2g} v^{\frac{2}{3}} = \frac{Fv^3}{16} \text{ kgm}$$

. Door verschillende omstandigheden levert hij echter van dit bedrag slechts het kleine gedeelte $C_e\ Fv^3/16$ kgm per sec.

Met modellen in de windtunnel, waar een gelijkmatige windstroming heerst, bereikt men ongeveer $C_e = 0{,}3$. Bij werkelijke molens blijft men lager, tengevolge van de ongelijkmatigheid van de wind. De Prinsenmolen te Hillegersberg gaf met de oude wieken $C_e = 0{,}09$; nadat het wiekprofiel was verbeterd, door de voorkant van elke wiek (de ‘roede’) te bekleden met een

mooi afgeronde metalen mantel, was de weerstand bij het doorklieven der lucht aanzienlijk geringer geworden, zodat C_e = 0,17 werd bereikt. Een belangrijk bezwaar is steeds de remming van de wind door de molenromp.

> Bereken in paardekrachten het vermogen van een windmolen, van een windrad, van een tuinmolentje; 75 kgm per sekunde = 1 paardekracht.
> Op 20 meter vóór een grote windmolen is de wind nog bijna ongestoord. Meet nu ook de windsnelheid vlak bij het molenlichaam, waar de wieken het onderste gedeelte van hun baan beschrijven (§ 159): de windsnelheid is daar verminderd tot ongeveer ⅓ van de normale.

De snelheid aan de omtrek is als kenmerk gekozen voor de volgende indeling:

1. traaglopers, met veel vleugels; u/v = 1 tot 2.

2. middelsoort molens, bv. de oude windmolens; u/v = 2 tot 3.

3. snellopers; u/v = 3 tot 4.

Schat de windsterkte op de plaats van de molen (volgens §§ 156, 159) en bepaal telkens de daarbij passende omtreksnelheid; doe dit bij verschillend sterke wind en neem telkens de verhouding u/v.

168. Laminaire luchtbeweging langs gestroomlijnde oppervlakken.

Het is een echt Hollands gezicht, als de hagelwitte was aan de waslijn hangt te fladderen, helder in de zon tegen een achtergrond van groene weiden en blauwe lucht! Aan die fladderende dingen valt er echter ook een natuurkundige waarneming te doen: strak aangespannen stukken klapperen onregelmatig op en neer; ruim aangespannen stukken daarentegen gaan bol staan in sierlijke welving, zij waaien constant uit, niet alleen tot in de horizontale stand, maar zelfs nog hoger, in schuin opwaartse richting.

In het eerste geval vormt de wind aan de randen van het doek overal wervels, die een voor een loslaten en daarbij echte stoten veroorzaken: de stroming is *turbulent*. In het tweede geval neemt het oppervlak de stroomlijnvorm aan, de luchtdeeltjes kunnen nu zonder werveling, *laminair* voorbijglijden. En nu zien we ook hoe een horizontale wind, langs een dergelijk zacht opwaarts gewelfd oppervlak strijkend, er een opwaartse druk op uitoefent.

We herinneren ons hoe een vlieger beter opstijgt als het doek los gespannen is en hol gaat staan (§ 166); hoe de zeiler opzettelijk voor welving van zijn zeilen zorgt, teneinde de windkracht beter te gebruiken (§ 65). - We letten ook op de doorbuiging van de vogelvleugel, die zo volmaakt aan de beweging door de lucht is aangepast. -

Die merkwaardige dwarse kracht, door een windstroom op een gebogen oppervlak uitgeoefend, wordt voortdurend in de vliegtechniek gebruikt; het vleugelprofiel wordt nauwkeurig zo gevormd dat de stijgkracht zo groot mogelijk is ('oppervlak van Joekovski').

169. Laminaire en turbulente stroming in een lucifersdoosje.[1] (fig. 134).

Een echt roker houdt er zijn eigen methode op na, om bij winderig weer een lucifer aan te steken en aan 't branden

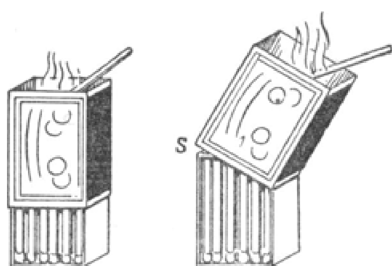


Fig. 134. Turbulente en laminaire luchtstroming in een lucifersdoosje.

te houden. Natuurlijk kunt u met de rug naar de wind gaan staan; maar dat is dikwijls onvoldoende. Beter helpt het, wanneer u het lucifersdoosje voor ¾ uit de huls schuift, en de lucifer onmiddellijk na het aanstrijken in de beschermende holte van de huls brengt. - Maar daar hoort nog een kunstgreep bij! Merk op hoe onregelmatig devlam brandt, hoe ze flakkert en rechts en links weggeblazen wordt: klaarblijkelijk zijn er werveltjes, die dikwijls de lucifer uitdoven. Dit vermijdt u, door de huls zóver uit te schuiven, dat het doosje er *schuin* in kan, en dat u bij S een spleet kunt open houden. De lucifer brandt nu veel regelmatiger en dooft niet uit; als de wind te sterk wordt, kunt u de spleet nauwer maken, als hij luwt, weer wijder.

Denk niet dat de rol van de spleet daarin bestaat dat er meer verse lucht door aangevoerd wordt voor de verbranding: als u de proef zonder spleet in een rustige kamer neemt, flakkert de vlam niet, ze heeft dus zuurstof genoeg. Het verschil is echter te zoeken in de stromingswijze van de lucht, die met spleet *laminair* is, zonder spleet *turbulent*. Het zijn de twee kenmerkende bewegingsvormen die we ook bij stromende vloeistoffen al hebben leren kennen (vgl. § 78, 168).

1) F. Rossmann, Met. Zs. **52**, 77, 1935.

170. Draaiende regendruppels. (fig. 135)[1]

Van de grote regendruppels op de treinruiten, die aan het

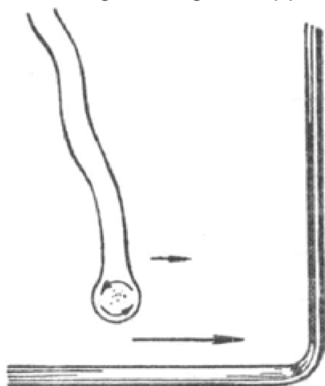


Fig. 135. Draaiende regendruppel op de ruit van een trein.

eind van hun baan gekomen zijn, bevinden er zich een aantal in draaiende beweging; kleine stofjes en roetkorreltjes van de rook der lokomotief, die er in zijn komen waaien, worden door die beweging meegevoerd en wijzen ze aan. Het gaat vrij snel: wel een paar omwentelingen per sekunde, en altijd in dezelfde zin: blijkbaar is de windstroom

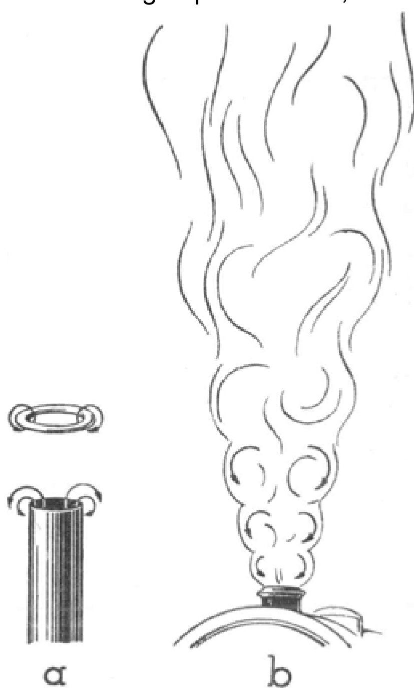


Fig. 136. Wervelingen boven de uitlaatpijp *a*) van een benzinemotor, *b*) van een lokomotief.

aan de onderkant van de druppel sneller dan aan de bovenkant. Aan het raampje aan de andere zijde van onze coupé geldt dezelfde regel. We moeten dus aannemen, dat de luchtstroom aan de bovenkant van de druppel geremd wordt door de sporen van de druppelbaan die zich nog op de ruit bevinden; het verschil in snelheid van de windstroom onder en boven de druppel geeft aanleiding tot de draaibeweging.

Als de trein stopt houdt de werveling op; zet hij zich weer in beweging, dan begint het wervelen met stootjes, onregelmatig, tot zich langzamerhand een stabiele toestand heeft ingesteld.

1) Observatory, **64**, 32, 1941.

171. Wervelringen.

De schepen die op onze binnenwateren varen hebben thans haast alle een petroleum- of benzinemotor. Uit het schoorsteenpijpje, waaruit de verbrandingsgassen puffen, komen dikwijls prachtige wervelringen van rook, die bij elke zuigerslag de lucht in geschoten worden (fig. 136). Zij ontstaan doordat de rookgassen nabij de wand van de buis wrijving ondergaan; in de meer centrale delen is dus de snelheid groter, en bij het uitstromen gaan die om de randlagen draaien. De aldus gevormde wervelring schiet recht en snel als een projektiel naar omhoog, het is iets geheel anders dan de gewone dwarrelende rookpluim die zich langzaam, aarzelend verheft. Kelvin en Helmholtz hebben laten zien dat in een ideale (wrijvingsloze) vloeistof zulk een wervelring, eenmaal gevormd, *nooit* meer verdwijnen kan; en zij dachten hier een beeld te zien van de oerbouwsteen der materie: een 'atoom', dat bestaan zou uit een wervelring in de aether.

Herhaaldelijk kan men opmerken hoe een wervelring A, die toevallig wat krachtiger is afgeschoten, de vorige B inhaalt; dan trekken ze elkaar aan, en bliksemsnel kruipt A door B! Ik heb zelfs eens gezien hoe B, die nu de onderste geworden is, op zijn beurt weer door A kroop! - Het gaat echter alles heel snel.

De stoom die uit de schoorsteen van een lokomotief opstijgt vormt ook wervelringen, maar veel minder duidelijk; toch ziet men de wervelende beweging nog wel in de eerste puffen van een vertrekkende trein (fig. 136*b*).

172. Windwervels.

Meer dan eens zien we hoe de wind gaat wervelen in de inspringende hoek van een gebouw; stof en dorre bladeren dwarrelen

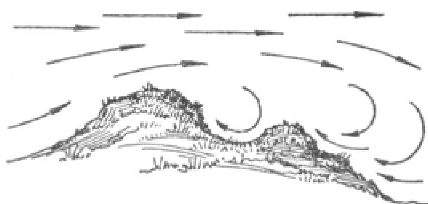


Fig. 137. Windwervels achter de duinen.

op, er zijn zelfs gevallen bekend dat het water van een vijvertje door zulk een wervel tot 8 meter hoogte werd meegevoerd en opgezogen[1)]!

Minder heftig, maar groter van afmetingen zijn de wervels die zich achter elke heuvel ontwikkelen in golvend landschap: als men in de luwte de helling beklimt, voelt men dikwijls de wind

1) Molly, Das Wetter, **34**, 76, 1917.

in de rug (fig. 137). Geregeld kan men dit opmerken wanneer men bij Westenwind tot onze duinen nadert van de landzijde. In de meeste duinpannen kan men duidelijk voelen dat er zich een wervel heeft gevormd.

De grote koepel van het Kurhaus te Scheveningen is omringd door vier kleinere koepels, elk met een vlag. Als een der kleine koepels in de windschaduw ligt van de grote, ziet men zijn vlag in tegengestelde richting wijzen van de drie andere!

Het is welbekend, dat de regenmeters op het platte dak van een gebouw, naast het gebouw en op grote afstand er vandaan een zeer verschillende hoeveelheid regen kunnen aanwijzen. Om het gebouw en om de regenmeters zelf ontstaan namelijk windstuwingen en wervels, die de regen ongelijk verdelen (**II**, § 140).

173. Nevelzuilen.

In de herfst en in het voorjaar, als 's nachts de lucht door straling is afgekoeld en 's ochtends het water warmer is dan de lucht die erover strijkt, vormen er zich riviernevels (vgl. **II**, § 99). Ook op zee is het verschijnsel bekend als het ‘dampen van de zee’. Men ziet dan soms hoe werveltjes in de nevellaag ontstaan, en hoe zich plaatselijk een draaiende beweging ontwikkelt. In een bepaald geval[1] vormden zich honderden van die werveltjes in een half uur; ze hadden ongeveer 30 cm middellijn, waren tot 7 meter hoog, en bereikten een draaiingssnelheid van 1 omwenteling in 2 sekunden; elke wervel bleef maar een paar minuten bestaan. Boven de warme Golfstroom komen er in sommige jaargetijden nevelzuilen en hozen van allerlei afmetingen voor. Op het meer Ontario ziet men soms een nevellaag rusten, waaruit honderden nevelzuilen opstijgen, die zich in enkele sekunden tot een hoogte van 200 meter omhoogschroeven[2]!

Nog een ander voorbeeld op kleine schaal werd waargenomen op een plein dat na een regenbui in de felle zonneschijn te blakeren lag[3]; de granieten wandelweg om het plein was al opgedroogd, maar de aarde was nog nat en zwart; ze dampte. Reeds op kleine hoogte boven de grond condenseerde de damp. En nu zag men hoe zich miniatuurwervels vormden, van een 60-tal cm hoogte en een 60-tal cm middellijn, die langzaam draaiden, soms in de rechtse, soms in de tegengestelde zin. Het merkwaardige verschijnsel duurde wel een kwartier, tot de aarde weer droog was.

1) M.W.R. **27**, 100, 1899.
2) Nat. **43**, 175, 1890.
3) Met. Zs. **48**, 112, 1931.

174. Werveltjes boven 't verwarmde aardoppervlak.

Boven het aardoppervlak dat door de zonnestralen verhit wordt heerst een steil temperatuurverval. De lucht die in aanraking is met de hete aarde is lichter dan de lucht in de omgeving en heeft neiging tot opstijgen, de toestand is dus labiel, precies als die van een kurk die zich onder in een glas water bevindt. Een uitgestrekte luchtmassa kan echter niet als een geheel opstijgen; maar als er hier en daar punten zijn waar het opstijgen begint, schiet de warme lucht als een fonteintje omhoog, en dan gaat de opstijgende luchtzuil meestal ook wervelen, doordat de lucht niet even sterk van alle kanten toestroomt. Men begrijpt dat de werveltjes zich dikwijls daar zullen vormen waar er een aanleiding tot opstijgen te vinden is: aan de rand van een plateau, boven een zandhoop, enz.

De draaiingsrichting hangt van toevalligheden af, ze zal soms in de zin van het uurwerk zijn en soms tegengesteld. Op zulke sneldraaiende wervels heeft de draaiingsrichting der Aarde praktisch geen invloed, in tegenstelling met wat bij de grote gebieden van lage druk, de barometrische depressies, het geval is. Door de wijze van ontstaan en door de afmetingen onderscheiden de luchtwerveltjes die we hier bespreken zich trouwens scherp van de hozen en de grotere dampkringwervels.

Klassieke voorbeelden van luchtwerveltjes heeft men waargenomen boven de hete lava der vulkanen en in de zandwoestijnen van Azië. Uit de volgende korte beschrijvingen zal men kunnen zien dat ze zich ook in onze gewesten vertonen en tot zeer merkwaardige verschijnselen aanleiding geven.

1. Warm (20°), windstil, op hoogvlakte. De waarnemer hoort een snorkend geruis, tot op 100 m afstand waar te nemen; stof begint in een kring te draaien en op te stijgen; na ⅓ min. zijn de dorre bladeren al tot 50 m hoogte opgewerveld, beneden heeft de wervel 0,50 m middellijn, boven 4 tot 5 m. De wervel beweegt langzaam vooruit en de waarnemer kan hem gaande volgen; af en toe verheft zich het onderste uiteinde 0,30 tot 0,50 m boven de grond. Door zijn jas uit te trekken en horizontaal uitgespreid te houden slaagt hij erin het onderste einde van de werveling af te snijden, zodat daar de draaiende beweging verdwijnt (dit is een heel belangwekkende proef!). Binnen de 10 minuten vormen zich nog verscheiden andere wervels.[1]
2. Warm, windstil; wervel van 8 m hoog, 0,60 m breed; de voet verbreed.

1) Zs. f. Meteor. **18**, 462, 1883. Bij een andere dergelijke waarneming was het geluid een zwak ritselen en suizen.

3. Warm, rustig; zandwervel, tot 90 m hoog, 2 m breed op het midden der hoogte, boven verbreed tot 4 m, ook de voet verbreed. Na een 3-tal minuten lost de wervel zich in een zandwolk op. Daarna ontstaan nog kleinere wervels; later onweer.
4. In het vrije veld ontstaat een wervel, terwijl het overal elders bladstil is. Hooi wordt tot grote hoogte opgewerveld. - Als hooi op de polder is uitgespreid en door de zon verhit, schijnt daarboven dikwijls een laag hete lucht te ontstaan die werveltjes vormt.
5. Vrij warm, weinig wind. De aandacht van den waarnemer wordt getrokken doordat hij iets hoort ritselen. Een kleine wervel heeft zich gevormd en rukt alle dorre bladeren van een eikeboom; middellijn 15 m, hoogte 40 m; beweegt langzaam vooruit met een snelheid van 10 km/uur. De bladeren krijgen snelheden van 10 m/sec, in het midden stijgen ze op met een snelheid van wel 5 m/sec, en vallen dan achter de wervel neer in blijkbaar rustige lucht. Duur: enige minuten.[1]
6. Rustige lucht. Zandvlakte in de felle zonneschijn. Een zuil van zand, hooi enz. stijgt op, naar boven wijder wordend, langzaam in draaiing komend. Veertjes worden opgezogen, een blad papier in de wervel beschrijft ongeveer een omwenteling per sekunde. De gehele wervel verplaatst zich met een snelheid van ongeveer 0,70 m/sec. Als men er doorheen loopt (met dichtgeknepen ogen), voelt men zijn kleren opwervelen en krijgt men de indruk van felle hitte; de thermometer wijst 51° aan![2]
7. Bij veenbranden ontstaan geregeld werveltjes; men heeft er bij windstil weer 20 tot 50 per uur zien opdwarrelen, sommige verhieven zich tot 300 m hoogte.[3]
8. Aan het strand en in de duinen vormen zich werveltjes bij felle zon en windstilte, vooral boven beschutte Zuid- of West-hellingen en in windholten, tussen 12 en 15 uur. Op de Boschplaat (Terschelling) ziet men ze in de verte als witte zuilen tegen de blauwe lucht.[4]

   Een foto of een film van zulke werveltjes zou zeker interessant zijn; bij belichtigen van ½ of 1 sec zouden de banen der dorre bladeren op de plaat streepjes tekenen, waaruit de snelheid der luchtstromingen te bepalen is.
9. ‘'t Was op een prachtige zomerdag, dat we wandelden van den Dolder naar Huis ter Heide. Het was ideaal zomer-

1) Americ. meteor. Journ. **7**, 1890.
2) C.R. **124**, 257, 1897.
3) De Natuur, 1900.
4) Van Dieren. Organogene Dünenbildung. (Diss. Amsterdam, 1934).

wandelweer, zonnig, fris, nog geen kwestie van iets drukkends-onweerachtigs (hoeveel enige uren later er wel een flinke regenbui kwam). Heel weinig wind, zo even nu en dan een fris koeltje, juist om het prettig te maken.
Bij één van de boswegen kwamen we aan een punt, waar de laan met hoge beukebomen uitliep op vrij hoog kreupelhout. Het was de bekende zandgrond-omgeving; wat zand- en grintkuiltjes, wat heidestruikjes, schrale plantengroei, veel dor beukenblad van 't vorige najaar over de grond, plekjes mos. Juist uitlokkend om te rusten, en ook de ogen rust te geven op het zachte kleurenspel van zomertinten, licht en schaduw. En bladstil.
Daar ineens, zonder naspeurbare reden, beginnen enige dorre bladeren als razenden in een kringetje rond te dwarrelen en op te vliegen, misschien een meter hoog. Dat dwarrelkringetje verplaatste zich, dwars over de hei en grintzandplekjes, in alle mogelijke richtingen, dan hier- dan daarheen, dan weer terug. Dat duurde een minuut of wat, en 't hield op, om even later weer te beginnen.
Voor mieren en spinnetjes was 't een echte tornado. Wie weet hoe 'n schrik die onder de kleine wezentjes heeft teweeggebracht. Voor ons was 't een aardig spelletje, om dat centrum van depressie te volgen, wat heel goed mogelijk was - zijn beweging was met lopen gemakkelijk bij te houden ......
....Wat is wandelen toch prettig en leerzaam!'
F. Ortt: '*Over Hoozen, groot en klein*'. (*Van en over Felix Ortt, den Haag* 1936).

10. Aan de oever van een rivier hoort men plotseling een heftig geruis in het riet langs de oever, en men ziet een zuiltje, bestaande uit een nevel van fijne waterdruppeltjes, dat over het wateroppervlak beweegt. Onder dit zuiltje schijnt het wateroppervlak ongeveer 30 cm te zijn uitgediept, over een cirkel van ongeveer 1,80 m middellijn; daaromheen een ringvormige zoom van water, 20-30 cm hoog.[1].
11. Kinderen lopen op zandgrond in een kring van 15 m middellijn. In het midden ontstaat een wervel die in dezelfde zin draait en zand tot 5 m hoogte opzuigt. Duur 2 min.[2]
Buitengewoon belangwekkend is de wet volgens dewelke de kleine luchtwervels voortbewegen[3]. Het is namelijk gebleken, dat ze zich altijd *dwars op de heersende wind* verplaatsen; en wel

1) Wegener, Ann. d. Hydr. **47**, 281, 1919.
2) Met. Zs. **51**, 275, 1934.
3) F. Rossmann, Reichsamt für Wetterdienst, Wiss. Abh. **3**, 1937.

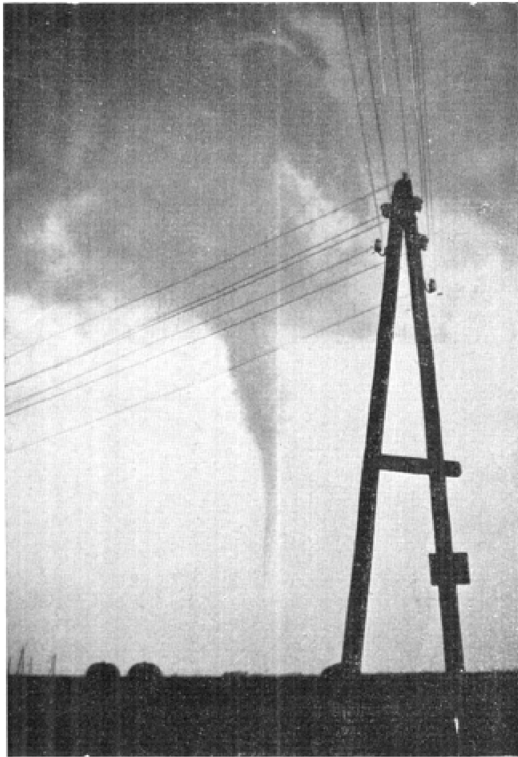
juist in die zin, zoals men uit het 'Magnus-effekt' zou voorspellen. Dezelfde dwarskracht, die een snel om zijn as draaiende tennis- of golfbal een kromme baan doet beschrijven (§ 49), verklaart hier de beweging der luchtwervels, die zich in dit opzicht dus min of meer als een vast lichaam gedragen. Ze worden echter tevens een weinig door de algemene windstroming meegevoerd, zodat ze niet geheel onder 90° met de wind, maar misschien onder 70° of 80° ten opzichte ervan bewegen.
Dat een zo eenvoudige, belangrijke wet slechts enkele jaren geleden ontdekt is, bewijst hoeveel er nog op te merken valt in 't vrije veld! Wie een luchtwerveltje waarneemt lette dus op draaiingszin, richting der baan, en richting van de heersende wind. Het schijnt, dat de baan niet altijd recht is, maar dikwijls op een cycloide met lussen gelijkt.
- Bestudeer de luchtstroom in de buurt van de wervel met een papieren wimpeltje.

175. Wind- en waterhozen.[1] - (Plaat XIII.)

Een hoos is werkelijk een zeer zeldzaam natuurverschijnsel; toch moet men bedenken dat er, alleen al in Noord-Nederland, gemiddeld een drietal per jaar worden waargenomen[2]. Als men dus maar weet wat er op te merken valt en zijn ogen goed opendoet, heeft men nog een redelijke kans het grootse schouwspel te beleven.

Op een warme zomernamiddag heeft de lucht zich verduisterd en is er een onweer opgekomen. Reusachtige cumulonimbuswolken rukken aan, het bliksemt en dondert, de wind is zwak en veranderlijk van richting. Daar begint de voorste donkere rand van een der cumulonimbuswolken benedenwaarts gerichte uitsteeksels te vertonen; ze verenigen zich tot een trechtervormig aanhangsel dat lager en lager daalt; als het dicht bij de grond komt, beginnen stof, bladeren, stro op te wervelen, tengevolge van de zuiging welke de hoos uitoefent. Om de voet vormt zich een echte wervelring, die er uit de verte uitziet als een soort ontzaglijke rookbal, en een paar honderd meter breed is. De zuil die daarboven opstijgt kan een 40 meter breed en een 1000 meter of meer hoog zijn; om haar heen stijgen het stof en de lichte voorwerpen op, zodat het duidelijk is dat de zichtbare wervel door een onzichtbare wervel omgeven is. De zuil zelf is *hol*, want op een heldere achtergrond gezien zijn de randen donkerder dan het midden; het is alsof er licht van boven in de centrale holte doordrong.
Men ziet de dampen in een schroef-

1) Standaardwerk: A. Wegener, Wind- und Wasserhosen in Europa (Vieweg, 1917).
2) Hemel en Dampkring, **26**, 1, 1928.



PLAAT XIII*a*. Windhoos (§ 175).
Naar B.C. Elskamp, Hemel en Dampkring. **36**, 353, 1938.



PLAAT XIII*b*. Waterhoos (§ 175).
Naar C. van den Heuvel, Onweders enz., **57**, 61, 1936. Clichés in bruikleen van het Ned. Meteorologisch Instituut.



PLAAT XIV.
Nalichtend spoor van een vuurbol (§ 181).
Ongeveer 10 min. na het neerkomen gefotografeerd door den Heer A.J. van Stralen. (Vgl. Hemel en Dampkring **33**, 171, 1935; Astrophys. Norvegica **3**, 119, 1939).
Cliché in bruikleen van het Ned. Meteorologisch Instituut.

lijn omhoog of omlaag wervelen; in de meerderheid der gevallen (72%) is de draaiing tegengesteld aan het uurwerk (van boven gezien), dus zoals in de gebieden van lage barometerdruk. Voortdurend stroomt er van alle kanten lucht naar de hoos toe, maar tevens stroomt er aan de bovenkant evenveel lucht weg, zodat ze niet opgevuld wordt. Hoe meer wrijving, hoe smaller ze wordt; de trechtervormige vernauwing is dus een aanschouwelijk beeld van het toenemen der wrijving dichter bij de grond. In een aantal gevallen heeft men kunnen aantonen, dat de hoos niet ophoudt waar ze aan de wolk raakt, maar dat ze daar ombuigt en over verscheiden kilometers als *horizontale* wervel voortloopt. In andere gevallen vertoont de zuil boven een soort zak, die een aanwijzing zou kunnen zijn voor het bestaan van twee concentrische buizen: een korte buitenste en een lange binnenste buis.

Ondertussen stort een hagelbui neer, terwijl de hoos zich van ons weg beweegt met een snelheid van 25 km/uur; het hoogste gedeelte gaat vooraan, de voet volgt en blijft iets achter, zodat de hoos in de windrichting helt; dikwijls voert ze slingerende slangenbewegingen uit. Waar ze over een woud trekt, worden de bomen bij honderden omvergeworpen, daken van huizen worden door de plotselinge zuiging als door een ontploffing omhoog gelicht, stenen uit de grond gerukt, allerlei zware voorwerpen soms kilometers ver vervoerd. De hoos maakt een gedruis als een wagen die over hobbelige straatkeien rolt, en sommige waarnemers beweren dat men in haar spoor een reuk van zwavel kan opmerken (ozon?). Als de hoos over een wateroppervlak strijkt, spreekt men van een *waterhoos*; het geluid wordt dan veel zwakker, het is veeleer een gesis. Aan de voet van de hoos ziet men een centrale uitholling in het wateroppervlak, waar omheen zich een kroon van dansende, puntige golven verheft. Er zijn zelfs gevallen waarin deze kroon zich hoger en hoger verheft en een echte watertoren vormt van 10 of 20 m hoogte of meer. Tracht waar te nemen of het water in het midden der hoos opgezogen wordt, ofwel of het slechts de voet van de zuil omringt. Een waterhoos is meer cylindrisch dan een windhoos, doordat de wrijving over 't water altijd veel kleiner is dan over land (zie hoger).

Na een 10- of 20-tal minuten wordt het verschijnsel minder duidelijk; we bemerken uit de verte hoe het middengedeelte der zuil onzichtbaar wordt; het bovenste en onderste stuk trekken zich terug, worden breder, en langzamerhand verdwijnt de uitstulping van de wolken en bedaart het schuimende water.

- Deze beschrijving dient alleen om u te laten zien wat er onge-

veer aan een hoos op te merken valt. Als u ooit zulk een verschijnsel waarneemt, zult u wel bevinden dat tal van bijzonderheden volstrekt niet precies kloppen: er zijn hozen die bij sterke wind ontstaan en niet bij windstilte; er zijn er die 3 uur duren en zich over 400 km verplaatsen; er zijn er die voorafgegaan worden door hagel (in plaats van erdoor gevolgd te worden). Soms vormen zich verscheiden hozen tegelijk of kort na elkaar; soms splitst sich een hoos in twee andere of ziet men er twee zich verenigen; men kent 'blinde hozen', waarvan de zuil niet zichtbaar is, maar waarvan de wervelbeweging te merken is aan de korte wolkentrechter en aan het water dat bij de voet opschuimt. - Men lette dus op al de hierboven genoemde bijzonderheden één voor één, en merke alle afwijkingen onbevooroordeeld op. Bepaal de hoogte en de breedte der zuil, alsook de hoogte en breedte van de voet in hun verhoudingen tot elkander; bepaal ook enkele dezer grootheden in hoekmaat: als u optekent hoe laat en waar die waarneming geschied is, en in welke richting de hoos gezien werd, kunt u later de afstand terugvinden, en de hoekmaten in ware lengten omzetten. In het algemeen worden de afmetingen door de waarnemers onderschat!

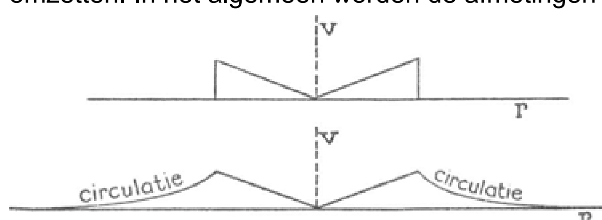


Fig. 138. De verdeling der windsnelheid in een jonge (boven) en in een oude hoos (onder). - Benaderd.

Als een hoos pas gevormd is, draait ze als een geheel, en in de wervel verschuiven de luchtdeeltjes niet ten opzichte van elkaar (fig. 138). Slechts na enige tijd begint de lucht *om* de wervel ook langzamerhand meegesleept te worden ('circulatiegebied'), maar beweegt daar volgens heel andere wetten, waarvan fig. 138 een ruwe benadering geeft. Een nauwkeuriger theorie[1] leert, dat beide gebieden vloeiend in elkaar overgaan; op afstand *r* van het centrum en op een tijd *t* is de snelheid voor te stellen door de uitdrukking:

$$V = \frac{Ar}{t^2} e^{\frac{-Br^2}{t}}$$

. Deze formule beschrijft hoe de wervel geleidelijk uitsterft, terwijl het snelheidsmaximum (aan de grens van binnengebied en circulatiegebied) naar buiten verschuift. -

Door de middelpuntvliedende kracht ontstaat in de centrale wervel een zui-

1) Afkomstig van Prof. Dr. E.F.M. van der Held, met wiens welwillende toestemming deze resultaten hier zijn medegedeeld.

ging: de wervelende gassen zijn geen delen van de wolk, die al wervelend lager en lager afdalen, maar lucht die van alle kanten toestroomt, opstijgt, uitzet, en afkoelt; meestal condenseert daardoor de waterdamp, en wordt de hoos zichtbaar als een nevelige trechter.

176. Het opnemen van de sporen van een hoos.[1)]

Om een hoos te zien kunnen we niet veel anders dan .... een gunstig toeval afwachten! Maar wat iedereen kan doen: zodra een bericht in de kranten verschijnt, zich naar de plaats begeven waar de hoos heeft gewoed, nauwkeurig de sporen der verwoesting onderzoeken, de bewoners ondervragen (veldwachters, treinbeambten), hen de hoos naar hun herinnering laten tekenen, en alles in kaart brengen wat men te weten komt. Men kan op die wijze het gehele natuurverschijnsel als het ware weer voor zich opbouwen.

1. Eerst tekenen we op de kaart de weg die de hoos gevolgd heeft, en bepalen zijn lengte en breedte. Als hij knikken vertoont, hangen die dan samen met de ligging van dalen of rivieren, met de grenzen tussen bos en veld? De breedte blijkt volmaakt overeen te stemmen met de middellijn van de wervelring aan de voet van de hoos; ze is vele malen geringer dan de breedte van het hagelgebied dat bij de hoos behoort: een bewijs dat deze twee verschijnselen van geheel verschillende aard zijn.

2. Zeer belangwekkend is het optekenen van de omgevallen bomen, één voor één, met de richting waarin ze liggen; iedere boom

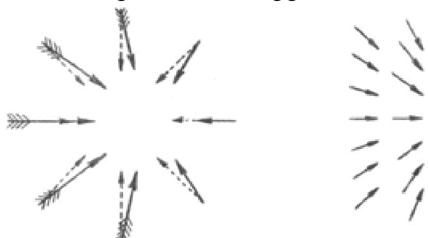


Fig. 139. Luchtstroming in een hoos. Links: radiaal toestromen (gestippelde pijlen) en de samenstelling van radiaal toestromen met de voortschrijdende beweging (voluitgetrokken pijlen); waar de windsterkte het grootst is zijn de pijlen gevederd getekend. Rechts: richting der omgewaaide boomstammen in het meest typische geval.

wordt door een streepje op millimeterpapier op de juiste schaal voorgesteld; de richting wordt met het kompas bepaald. Waar de hoos haar baan begon, liggen de boomstammen onregelmatig, maar verder bemerkt men weldra dat de weg van de hoos in drie stroken verdeeld is: in de middenste liggen de bomen in de richting waarin de hoos zich voortbewoog; in de twee buitenste stroken liggen ze schuin, naar de centrale strook toe. Blijkbaar ontstond daar de wind door samen-

1) Uitvoerige aanwijzingen in Met. Zs. **35**, 245, 1918; **45**, 434, 1928. Voorbeelden van dergelijke onderzoekingen in Nederland: Hemel en Dampkring, **14**, 81, 1916; **29**, 323, 1931.

stelling van de radiaal toestromende lucht met de voortschrijdende beweging (fig. 139).

Als men nauwkeuriger waarneemt, vindt men dikwijls een zekere asymmetrie tussen de twee zijstroken: *a*) de linker is minder scherp begrensd dan de rechter, en dikwijls slechts door zeer weinig bomen vertegenwoordigd; *b*) de richting van de bomen in de linkerstrook vormt een grotere hoek met de bewegingsrichting dan in de rechter. Deze verschillen bewijzen dat de lucht niet eenvoudig radiaal naar de voet van de hoos stroomt, maar dat er ook een draaiingsrichting in was, waarvan de samenstelling met de andere stromingen de waargenomen asymmetrie geheel verklaart. Het is dus duidelijk dat nabij het oppervlak van de grond de lucht in hoofdzaak naar de hoos toe stroomt, en slechts in geringe mate roteert. - Dikwijls is de regelmaat veel minder mooi dan we 't hier hebben geschetst, doordat het stelsel der luchtstromen blijkbaar ingewikkelder was.

Men kan het werk bekorten door het *opnemen langs dwarslijnen*. Op een goed kenmerkend punt trekt men een lijn dwars op de baan, en tekent nu alleen die bomen waarvan de wortels ten hoogste 4 m van die lijn verwijderd zijn; bij gekruiste, op elkaar liggende bomen wordt alleen die getekend welke het meest in de richting van de naburige ‘normale’ stammen ligt. Dergelijke dwarsopnamen voert men bij verschillende interessante punten der baan uit.

Zeer mooie windbanen vindt men in korenvelden, waarvan meestal de neergeworpen aren als echte ‘krachtlijnen’ gerangschikt zijn.

3. Vervolgens verzamelen we alle aanwijzingen die we kunnen vinden omtrent voorwerpen die door de hoos vervoerd en een eind verder neergevallen zijn. De berichten die men hierover verneemt zijn wel belangwekkend, maar de hoofdzaak ontbreekt gewoonlijk: de nauwkeurige aantekening op de landkaart van de punten waar elk voorwerp vandaan gehaald en tenslotte terecht gekomen is. In vele gevallen vindt men door het onderzoek ter plaatse dat er banen van 10 of 20 km lengte en meer beschreven zijn, altijd aan de linkerzijde van de hoosbaan, dikwijls echter sterk afwijkend van richting, zodat men wel moet aannemen dat de hoos aan haar boveneind door een lange horizontale wervel werd voortgezet. Van de 258 Europese hozen wier beschrijvingen door Wegener bewerkt zijn, was er maar één waarbij behoorlijk gelet was op deze zo merkwaardige transportverschijnselen! Gevallen van ‘visregen’ of ‘kikvorsenregen’ zijn natuurlijk bijzonder belangwekkend (vgl. **II**, § 153).

4. Bepaal volgens de mondelinge berichten het gebied waar regen en hagel gevallen zijn. Gewoonlijk is de hoos *aan de rand* van dit gebied ontstaan. Aan de vóór- of aan de achterkant? Links of rechts? Vormde de hoos zich vóór de regen (of hagel) viel, of later? - Deze inlichtingen hebben groot belang, omdat Wegener dacht dat de hozen gevormd worden door de kraag van de hagelbui, die zich als een lange horizontale wervel uitstrekt, en waarvan de uiteinden naar beneden buigen (fig. 140); aan de voorkant van de bui zou de lucht opwaarts wervelen,

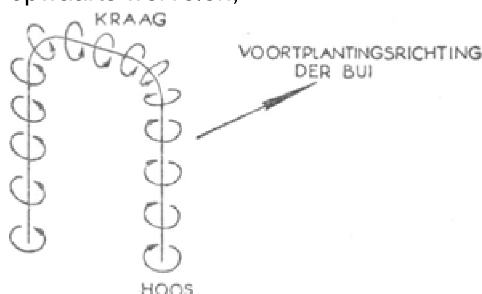


Fig. 140. Schematische voorstelling van een hoos als uiteinde van een werveldraad (volgens de oude theorie van Wegener, 1911).

en daaruit zou dan volgen dat hozen rechts van het onweergebied in de richting van het uurwerk moeten draaien; links omgekeerd. De waarnemingen schijnen veeleer op het tegendeel te wijzen, hetgeen door Professor van Everdingen toegeschreven is aan een snel met de hoogte toenemende windsterkte;[1)] de draaiingszin van de werveling zou dan juist het omgekeerde zijn van wat in fig. 140 getekend is. Wegener heeft thans die opvatting overgenomen[2)]. - Hozen links van het onweergebied komen zelden voor.

177. De lengte van stoompluimen en de uitwisselingsconstante van de dampkring.[3)]

De lengte van de stoompluim van een lokomotief is soms groter, soms kleiner, en het is belangwekkend om na te gaan van welke faktoren die lengte afhangt. De concentratie van de waterdamp in de omgevende lucht zij *s*; de stoomtoevoer verhoogt de waterconcentratie tot $s + \Delta s$, zodat de lucht verzadigd

1) Hemel en Dampkring, **23**, 305, 1925; **26**, 1, 1928; **36**, 348, 1938.
2) Wegener, Met. Zs. **45**, 201, 1928.
3) W. Schmidt. Met. Zs. **43**, 292, 1926. Voor een algemene bestudering van het belangrijke begrip ‘Austausch’, en allerlei toepassingen op dampkringsverschijnselen: W. Schmidt, Der Massenaustausch in freier Luft’ (Hamburg 1925).

wordt en een wolkvormig neerslag van waterdruppeltjes vertoont. Nu verspreidt zich de stoom door de wervelingen van de dampkring, de concentratie van het water neemt af naarmate we ons verder van de lokomotief verwijderen, de waterdruppeltjes verdampen weer, en waar de lucht net niet meer verzadigd is houdt de stoompluim op. Tevens zou ook moeten bedacht worden, dat de temperatuur der lucht door de stoomtoevoer verhoogd was; maar dit blijkt slechts van geringe invloed te zijn.

Men kan aantonen dat de waterdamp zich op zulk een wijze verspreidt, dat zijn concentratie in de as van de rookpluim aldus met de afstand *r* afneemt:

$$\Delta s = \frac{\sigma}{4\pi A r}$$

. Hierin is σ de luchtmassa waarvan de dampdruk door de stoomtoevoer met 1 mm per sekunde verhoogd kan worden; *A* is de uitwisselingsconstante, die een maat is voor de dooreenroering van de lucht. Dan geldt dus aan het uiteinde der stoompluim:

$$s + \frac{\sigma}{4\pi A r} = S$$

(= verzadigingsdruk), of

$$r = \frac{1}{4\pi A} \cdot \frac{\sigma}{S - s}$$

.

De lengte der stoompluim is dus omgekeerd evenredig met de uitwisselingsconstante en met het verzadigingstekort; was de lucht buiten al met waterdamp verzadigd, dan werd de stoompluim oneindig lang. Die lengte hangt echter *niet* af van de treinsnelheid noch van de windsnelheid; de lengte der stoompluimen van twee treinen die de ene met, de andere tegen de wind rijden, moet gelijk zijn. Wel zal bij sterke wind de stoompluim korter zijn, *maar alleen* tengevolge van de grotere werveligheid *A*.

Een lokomotief in volle vaart verbruikt ongeveer 2 kg water per sekunde en zet die om in waterdamp. Deze heeft ten opzichte van lucht een soortelijk gewicht 0,60, in normale omstandigheden van druk en temperatuur; verspreidt hij zich dermate, dat zijn drukking afgenomen is tot 1 mm, dan is zijn dichtheid ten opzichte van lucht slechts 0,60/760. Dus kan 1 g water de dampdruk van 760/0,60 g lucht met 1 mm verhogen, en zo wordt

$$\sigma = 2000 \cdot \frac{760}{0{,}6} = 2{,}45 \cdot 10^6 \text{ g}$$

. Voor een verzadigingstekort van 1 mm en *A* = 1 (zeer rustige lucht) zou de lengte 1940 m worden, wat wel aannemelijk is. In 't algemeen is *A* op enige meters hoogte van de orde 10 tot 100. Uit de damppluim van een stoomboot werd bepaald *A* = 12.

Doe een aantal bepalingen van *r* en *S* - *s*, dit laatste met behulp van de psychrometer, II § 94; bereken telkens de uitwisselingsconstante uit:

$$A = \frac{1940}{r(S - s)}$$

, waar *r* in m, *S* en *s* in mm kwik zijn uitgedrukt. Het is voldoende wanneer men de orde van grootte vindt van deze moeilijk te bepalen constante. Zij is van het grootste belang voor de verspreiding van stofdeeltjes, van radioaktieve stoffen, van warmte, enz. in onze dampkring.

De uitwisselingsconstante van de dampkring op een gegeven ogenblik hangt in hoofdzaak af van de graad van turbulentie, van werveling die de luchtmassa's door elkaar roert. De gehele stemming van het landschap ondergaat daar de invloed van. - Vergelijk de zacht gebogen lijn van de rookzuil, die bij rustige maannacht uit een schoorsteen opstijgt, met de golvende, kronkelende lijnen van de rookpluimen bij dag, ook al is de wind slechts matig sterk; bekijk ook de voortdurende snelle vervormingen bij stormwind. Bedenk daarbij, dat het niet de wind*snelheid* zelf is, die deze vervormingen teweegbrengt, maar het *onderlinge* snelheids*verschil* tussen de naburige volumeelementen der bewegende luchtlaag. U ervaart dus, dat de turbulentie in 't algemeen tegelijk met de windsnelheid toeneemt, maar volstrekt niet altijd.

178. Adempluimen.

In de winter zien we hoe onze adem bij het uitademen tot een nevel van fijne druppeltjes verdicht wordt. Bij warme, droge lucht is de adem niet zichtbaar; er zijn allerlei overgangen, en men kan uit vorm, grootte en dichtheid van de adempluim iets over de vochtigheidsgraad der lucht zeggen.

Du Bois Reymond bemerkt, dat de adempluim beter zichtbaar wordt als men de lucht eerst zo sterk mogelijk in de borstholte samengeperst houdt, en dan ineens de mond opent. Door de plotselinge ‘adiabatische’ uitzetting wordt de uitgeademde lucht afgekoeld en de waterdamp condenseert, vooral als er stofkernen in de buurt zijn. Dit belangrijke verschijnsel is dus zonder enig toestel rechtstreeks aan te tonen! De waarneming gelukt het best op dagen waarop de adempluim *net* zichtbaar is en goed door de zon verlicht wordt.

Laten we eens beproeven de formule voor de lengte van stoompluimen op de zoveel kleinere adempluimen toe te passen. Bij een gewone uitademing, die misschien ⅓ sec duurt, doen we ongeveer 0,5 1 lucht uitstromen die verzadigd is bij lichaamstemperatuur (37°); de waterdamp in die ademhalingslucht

heeft dus een spanning van 47 mm en weegt
$0{,}5 \times \frac{47}{760} \times 0{,}6 \times 1{,}293 = 0{,}024$ g
. In onze formule wordt nu
$\sigma = 0{,}024 \times 3 \times \frac{760}{0{,}6} = 91$
. Dus:

$$A = \frac{7{,}2}{r(S - s)}$$

. Als dus de adempluim bv. 36 cm lang is, bij een verzadigingstekort van 1 mm, moet men besluiten dat *A* = 0,2. In het algemeen vinden we waarden van 0,1 tot 1, die aanwijzen dat de lucht in de eerste meters boven de grond zeer rustig is en weinig wervelingen vertoont. We moeten er ons echter wel rekenschap van geven dat het zeer gewaagd is de formule tot zulke korte stoompluimen uit te breiden, en dat we niet veel meer kunnen verwachten dan een ruwe benadering.

179. Reukwaarnemingen.

Wie het landschap buiten heeft genoten, weet hoezeer de geuren in al hun verscheidenheid tot het vormen van de stemming bijdragen. Ozon of stikstofoxyden ruikt men na sterke onweders. Waterdamp zou een reeks eigen geuren hebben, afhankelijk van zijn concentratie (zijn dit niet veeleer verschillende verontreinigingen?). Bloemengeuren ruikt men in de zomermaanden.

Een zeer eenvoudige en doeltreffende indeling der natuurgeuren is gegeven door W. Hellpach[1)]:

bloemengeuren;
weide-, hooi-, heide-, woudgeuren;
houtgeur;
watergeur (rottende plantaardige bestanddelen);
aardgeur (rottende bladeren);
mest (hetzij ‘onaangenaam’, hetzij ‘landelijk’, volgens onze stemming).

De ‘*waterdampgeuren*’ worden door Dreis[2)] op de volgende wijze onderverdeeld:

1. Als een gebied van hoge druk vervangen gaat worden door een nieuwe depressie: een heerlijke frisse, zuivere geur, gelijkend op de hooilucht, de vochtige ‘lentelucht’; een uiterst kenmerkende indruk! In de herfst kondigt hij regen aan na veel dagen hoge druk, in de winter zacht weer na koude.

1) Geopsyche (Leipzig, 1935).
2) J. Dreis, Met. Zs **26**, 517, 1909.

2. Na een regenbui: een dergelijke geur, maar ‘men ruikt meer de regen.’
3. Bij nevel in hogedrukgebied, 's ochtends: een ‘dampgeur’; de nevel zal optrekken.
4. Bij regenweer met losse wolken: deze geur is ‘doffer’ geworden.
5. Bij regenweer met samenhangende wolkenlaag: de geur is nog doffer.
6. Bij nevel in lagedrukgebied: haast niet meer te ruiken, zeer dof.
7. Vóór onweer: vrijwel reukeloos, zeer dof.

De *bloemengeuren* zijn (alweer volgens Dreis) in een dergelijke schaal te rangschikken.

1. Het sterkst bij naderende lage druk, bij definitieve opklaring na lage druk, bij nevel in hoge drukgebied, en na regenbui. (Het is niet goed in te zien wat het gemeenschappelijke bij deze verschillende weertoestanden is). - De meesten beweren dat de geuren sterker worden bij vochtigheid; anderen, bij droogte.
2. Minder sterk bij regenweer met losse wolken.
3. Nog minder bij naderend onweer.
4. Onmerkbaar tijdens onweer, bij regen met samenhangende wolkenlaag, bij regen in lagedrukgebied.

In deze rangschikkingen moge wat fantasie zijn en een zeker persoonlijk element. Maar ook een aantal juiste waarnemingen zijn erin verwerkt! Wie twijfelt moge daarom beginnen met zelf aandachtig en stelselmatig waar te nemen, en vorme zich dan een eigen oordeel.

Bloemengeur ruikt men het sterkst bij temperaturen van 5° tot 15° 's morgens en 's avonds, van Mei tot September. Eerst overheerst de meidoorn, in Juni de vruchtbomen en tuinheesters, in Juli het hooi (toe te schrijven aan cumarine), later de bloeiende linden en de klaver op de wei, nog later de lupine op de velden.

De geur van het bos is iedereen bekend. Hij is anders bij vochtig dan bij droog weer; dennebossen geuren bijzonder sterk als het geregend heeft en de zon daarna schijnt. Hij is ook anders volgens de samenstelling der flora; bijzonder fris ruikt het eikenhakhout. Tenslotte hangt hij af van het jaargetij, waarschijnlijk vooral door de grotere of kleine hoeveelheid afgevallen bladeren.

De geur van de zee is uiterst kenmerkend. Is het jodium? of ozon? Of de ontbindingsprodukten van wat de zee op het strand werpt?

Het is sedert lang bekend dat bij dalende barometer de grachten

en greppels van grote draineerwerken beginnen te ruiken. Dit schijnt hetzelfde verschijnsel als de bekende geur van vochtige aarde, die het plotseling invallend regenweer aankondigt. De verklaring zal wel zijn, dat de lucht die in de spleten en poriën der aarde zat dan voor een deel daaruit weggezogen wordt door de verminderde drukking. Dat zulk een effekt niet denkbeeldig is blijkt uit de blazende putten (§ 146).

Van de natuur- en scheikunde dezer reukstoffen is zeer weinig bekend. Onze organen hebben hiervoor een graad van gevoeligheid, die door geen meettoestel geëvenaard werd.

Hoe die buitelende wind, die naar het hooi rook van den zomer, verfrischte. Blank lag het veld, ...
Aart van der Leeuw, Sneeuw (*Vertellingen*).

Het nat haalde al de bloemreuken omhoog.
De scherpe reuk van 't open veld.
De kalme reuk der aarde.
Reuk van water, hooi en vlier.
De natte hof, waaruit de regen den zoetsten rozenreuk omhoogsloeg.
De reuk der platte aarde, die sedert dagen en dagen beregend was.
Timmermans, Pallieter, blz. 36, 55, 92, 116, 150.

Men wordt weer een wilde bij de geur van het woud.
Sully-Prudhomme.

180. De vallende sterren en de hoogste dampkringslagen.[1)]

Zoals men langs den heldren avondhemel
Somwijlen plotseling een vonk ziet schieten,
De ogen trekkend, die stil vóór zich zagen -
Het lijkt een ster, die van haar plaats wil vlieden.
Dante, Paradiso, XV, 13-16.

Iedereen kent de ‘vallende sterren’. Men ziet ze op de meest onverwachte wijze soms hier, soms daar aan de hemel oplichten, een lichtlijntje trekken, en weer verdwijnen. Het zijn geen sterren, het zijn kleine korreltjes, misschien een speldeknop groot, die veel vlugger dan een kanonkogel uit de wereldruimte aankomen, door onze dampkring vliegen, en daarbij door de grote snelheid waarmee ze tegen de luchtmolekulen botsen tot lichten gebracht

1) A.A. Nijland, Hemel en Dampkring, **32**, 241, 1934. - C. Hoffmeister: Die Meteore (Leipzig, 1937).

worden. Op bepaalde tijdperken van het jaar komt de Aarde door zwermen van die stofjes, en kan men soms een ‘sterrenregen’ waarnemen, waarbij alle banen schijnen uit te stralen van één bepaald punt aan de hemel: dat is natuurlijk een perspektief-verschijnsel, juist zoals de wolkenbanden (**II** § 130), het watertrekken der zon (**I** § 193), enz.; al die banen zijn eigenlijk *evenwijdig*.

Datum	**Uitstralingspunt**
Jan. 2-3	Draak
April 20-22	Lier
Mei 1-6	Waterman
Juli 28	Waterman
Aug. 10-13	Perseus
Aug. 31	Wagenman
Oct. 10	Draak
Oct. 18-20	Orion
Nov. 14-16	Leeuw
Nov. 17-23	Andromeda
Dec. 10-12	Tweelingen

Sommige zwermen zijn gekenmerkt door korte banen, andere door lange; sommige door langzaam bewegende meteoren, andere door snelle. De kleuren zijn de ene maal meer blauwgroen, de andere maal meer rood, oranje of geel; van de zwakste meteoren is het licht onvoldoende om een kleur te laten onderscheiden. Een waarnemer beweert ‘sissen’ te hebben gehoord[1)]: dat lijkt zeer onwaarschijnlijk, veeleer is dit een dergelijke begoocheling als bij 't poollicht (**II**, § 223).

Van ons standpunt stellen we vooral belang in de vallende sterren, omdat ze ons iets leren betreffende de buitenste lagen van onze dampkring en de grootste hoogten waar er nog een spoor van die dampkring overblijft, zij het ook zo ijl, dat die door geen andere verschijnselen aangetoond kan worden. - Het heeft tot in 1798 geduurd eer men iets te weten is gekomen over de ware hoogte waarop de vallende sterren oplichten. Twee jonge studenten der universiteit te Göttingen, Brandes en Benzenberg, besloten op eigen houtje waarnemingen te doen, en slaagden erin zonder enig hulpmiddel deze belangwekkende vraag op te

1) Ann. Hydr. **54**, 388, 1926.

lossen. Om hun werkwijze na te volgen, spreken we met een vriend af dat we op een bepaalde avond samen zullen waarnemen; we zetten onze horloges zo nauwkeurig mogelijk gelijk, begeven ons op een afstand van bijvoorbeeld 50 km van elkander, en tekenen nu zorgvuldig op een sterrekaart de banen van alle vallende sterren die we binnen een vooruit afgesproken stuk van de hemel waarnemen, daarbij de juiste waarnemingstijden vermeldend. Vooral de hemel loodrecht op de verbindingslijn van de twee waarnemers moet bewaakt worden. - Na afloop vergelijken we onze aantekeningen, zoeken of er volgens de waarnemingstijden vallende sterren bij geweest zijn die we allebei

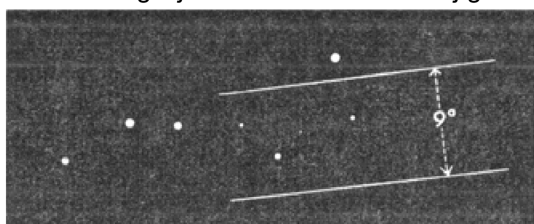


Fig. 141. Spoor van een vallende ster, gezien van uit twee verschillende waarnemingspunten.

hebben gezien, en onderzoeken of we hun banen *verschoven* hebben gezien ten opzichte van de sterren (fig. 141). Voor sterren in richtingen loodrecht op de verbindingslijn is de hoogte der baan dan:

$$\frac{50 \text{ km} \times \sin h}{\text{verschuivingshoek (in radialen)}}$$

, als *h* de hoogte boven de gezichteinder voorstelt. De twee Göttinger waarnemers vonden hoogten van 52 tot 170 km, en deze orde van grootte is ook later telkens bevestigd; slechts in heel zeldzame gevallen heeft men vallende sterren reeds op een hoogte van 400 km zien lichtgeven.

Voor de uitvoering dezer waarnemingen is het van belang te weten, dat men de meeste kans heeft vallende sterren waar te nemen in de herfst en na middernacht; men ziet er dan gemiddeld 10 tot 20 per uur. Nog gunstiger zijn natuurlijk de nachten waarin bepaalde zwermen optreden. In de tabel blz. 291 vindt men de belangrijkste zwermen, met de datum waarop ze meestal zichtbaar zijn.

181. Vuurbollen[1] - (Plaat XIV).

Vuurbollen zijn verwant met vallende sterren, maar veel groter en veel zeldzamer. Het zijn echte stenen, soms rotsblokken, die in de dampkring der aarde doordringen, gloeien en lichtgeven, een enkele maal zelfs op Aarde neervallen eer ze verdampt zijn. Dikwijls is het licht zo sterk, dat men de vuurbol in 't volle daglicht ziet; soms spat hij uiteen met een knal en gedonder. *De lichtverschijnselen langs zijn baan* zijn van groot belang voor onze kennis van de hoogste dampkringslagen, en het minutenlang *nalichtende spoor* van grote vuurbollen geeft ons gewichtige aanwijzingen over de luchtstromen op die grote hoogten. Men is overeengekomen de naam van ‘vuurbollen’ voor te behouden voor lichtverschijnselen helderder dan Jupiter, terwijl men de zwakkere ‘vallende sterren’ noemt; maar een scherpe grens is er natuurlijk niet.

Vuurbollen zijn zó zeldzaam, dat het geen zin heeft die stelselmatig te beproeven waar te nemen. We zijn aangewezen op de tegenwoordigheid van geest van toevallige ooggetuigen, en moeten dus trachten het grote publiek zoveel mogelijk in te prenten wat er in zulk een geval waar te nemen valt. Hoofdzaak is altijd het bepalen van de ware baan. Dit is mogelijk als dezelfde vuurbol van verschillende plaatsen uit gezien is. Hier volgen de voorschriften waar de waarnemers op te letten hebben.

1. Blijf onmiddellijk staan en begin sekunden te tellen, tot de vuurbol verdwijnt; de duur van de zichtbaarheid is dan bekend.
2. Neem het horloge ter hand en lees de tijd af, die u later zult corrigeren door vergelijking met een standaardklok of tijdsein.
3. Bepaal met het horloge het tijdsverloop tussen het uiteenspatten en de donder die meestal op grote vuurbollen volgt; dit tijdsverloop kan verscheiden minuten bedragen!
4. Maak een schetsje, waarin u zo goed mogelijk de baan tekent ten opzichte van de omgevende sterren, schoorstenen, telegraafdraden, bomen; vooral *het eindpunt* moet zo nauwkeurig mogelijk vastgelegd worden; gewichtig zijn ook het beginpunt, de helling der baan en haar lengte. Heeft men een stok bij zich, dan kan men die zó houden als men zich herinnert dat de baan was, en dan rustig naar vaste vergelijkingspunten zoeken. Zijn er geen vergelijkingspunten te vinden (bij dag, of bij bewolkte lucht), dan geeft men voor begin- en eindpunt

1) Trowbridge, Ap. J. **26**, 95, 1907, - M.W.R. **35**, 390, 1907. - Ann. Hydr. **49**, 1921. - C. Hoffmeister: Die Meteore (Leipzig 1937).

de hemelstreek aan en de hoogte boven de gezichteinder.

5. Beschrijf de eigenaardigheden van het spoor: kleur, intensiteitsverandering; bij grote vuurbollen vormt zich een kegelmantel van weggeblazen gloeiende gassen of vloeistofdruppeltjes, die men als een dubbele staart ziet, en waarvan men de tophoek moet meten.
6. Als het spoor nalicht, is het van belang de veranderingen en verplaatsingen daarvan te volgen; hiertoe maakt men, telkens na enige minuten, een schetsje, goed de tijd noterend en met de omgevende sterren vergelijkend. Door een toneelkijkertje kan men de sporen langer en duidelijker waarnemen. Nog mooier is het wanneer men kan fotograferen.

In 't algemeen geve men zo uitvoerig mogelijk aan wat men gezien heeft en hoe men tot zijn schatting gekomen is. Het verder berekenen is nu zaak van de naastbijgelegen sterrewacht, waarvan de astronomen ons later wel zullen weten te vertellen hoe hoog onze meteoorsteen vloog. Men vindt, dat de hoogte van het punt waar de vuurbol begint op te lichten gemiddeld 140 km bedraagt, de hoogte van het uitdovingspunt 50 km, maar deze getallen kunnen tussen ruime grenzen variëren.

Het lichtgeven van vallende sterren en vuurbollen is te verklaren door de botsingen der luchtmolekulen tegen het snel bewegende steentje; dit omhult zich met een dampmantel, die de voornaamste bron van de uitgezonden straling wordt. Bij grotere stenen, die als vuurbollen waargenomen worden, kan de lucht vóór de meteoriet niet intijds uitwijken, zij wordt adiabatisch samengeperst en verhit.

Buitengewoon belangwekkend is *het nalichten van het spoor*. Bij een vallende ster ziet men zulk een nalichten dikwijls gedurende breukdelen van een sekunde; maar hier kan het minuten, tot een uur toe bedragen! Meestal is het slechts het middengedeelte der baan die nalicht, tussen 80 km en 100 km; het is zaak bij de beschrijving nauwkeurig aan te geven wat betrekking heeft op de baan zelf en wat op het veel kortere nalichtende gedeelte. Een dergelijk verschijnsel als dit nalichten treedt op bij bepaalde proeven in het laboratorium met zeer verdunde gassen (druk: 0,1 mm), bijvoorbeeld als stikstofatomen in ionen ontleed zijn en zich weer met de elektronen verenigen. Hoe lager de druk, hoe langer het duurt eer elk ion een ‘kameraad’ ontmoet heeft, en over hoe langer tijd zich het lichten uitstrekt.

Het lichtspoor is meestal vrij breed en *buisvormig*, hetgeen blijkt uit de vele waarnemingen van ‘dubbele’ sporen: aan de

randen van de buis ziet de waarnemer een dikkere laag lichtend gas dan in het midden. Het neemt snel in dikte toe en kan na 10 min. wel al 1° breed zijn (2 maal de diameter der maan, meer dan 1 km dikte!). Zonder twijfel is dit een *diffusie*verschijnsel dat opnieuw op de lage drukking wijst. Men kan rechtstreeks zien dat de drukking met toenemende hoogte afneemt, want het spoor verbreedt sneller bij het begin- dan bij het eindpunt, en neemt geleidelijk de vorm aan van een uitroepteken[1)]. Dikwijls bemerkt men ondertussen ook krommingen en kronkels die sterker en sterker worden, en die wijzen op *turbulentie* in deze hoge lagen (Plaat XIV); de dampkring is daar dus niet zo rustig als men menen zou, en het wordt begrijpelijk dat de aldus dooreengeroerde gassen op alle hoogten vrijwel dezelfde samenstelling hebben als hier beneden.

Door het nalichtende spoor ten opzichte van de omringende sterren te tekenen en van minuut tot minuut te volgen, vindt men de verplaatsing in hoekmaat; met behulp van de ware hoogte, door de astronomen berekend, volgt daaruit de snelheid der luchtstromingen in deze hoogste dampkringslagen. Men heeft aldus gevonden dat er boven de 80 km een algemene stroming *van West naar Oost* is, met een snelheid van de orde van 150 km/uur.

Er zijn ook enige zeldzame gevallen bekend van vuurbollen die men bij dag heeft gezien of in de schemering, verlicht door de stralen der ondergegane zon. Ze laten een spoor van rook, als een wollen draadje dat dikker wordt en meestal gaat kronkelen. Deze sporen zijn niet langer dan een kwartier gevolgd kunnen worden, maar dit is voldoende geweest om uit te maken dat ze zich op een hoogte bevinden van 30 tot 80 km, en dat de stroming daar *van Oost naar West* gericht is.

Beneden de 25 km kennen we de wind uit waarnemingen met loodsballons: daar is de algemene stroming weer *van West naar Oost* gericht.

Men ziet hoe belangwekkend de gegevens zijn die men uit waarnemingen van vuurbollen kan verkrijgen! Vooral voor de laag van 30-80 km, die met dagmeteoren moet worden verkend, is aanvulling van ons materiaal zeer gewenst: er zijn maar een kleine 20 gevallen bekend.

1) Zie bv. Hemel en Dampkring, **17**, 114, 1920.

Lijst van enkele afkortingen gebruikt bij het aanhalen van tijdschriften.

A.N. = Astronomische Nachrichten.
Ann. Hydr. = Annalen der Hydrographie.
Ann. Phys. = Annalen der Physik.
Ann. soc. météor. France = Annuaire de la Société météorologique de France.
Ap. J. = Astrophysical Journal.
Arch. sc. phys. nat = Archives des Sciences physiques et naturelles.
Berl. Ber. = Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Berlin.
C.R. = Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.
Enz. d. math. Wiss. = Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften.
Forsch. und Fortschr. = Forschungen und Fortschritte.
J.R.A.S. Can. = Journal of the Royal Astronomical Society of Canada.
Geogr. Journ. = Geographical Journal.
Met. Mag. = Meteorological Magazine.
Met. Zs. = Meteorologische Zeitschrift.
Mitt.Ver.Fr.Astr. = Mitteilungen des Vereins der Freunde der Astronomie, enz.
M.W.R. = Monthly Weather Review.
Nat. = Nature.
Peterm. Mitt. = Petermann's geographische Mitteilungen.
Phil. Mag. = Philosophical Magazine.
Philos. Trans. = Philosophical Transactions.
Proc. R. Inst. = Proceedings of the Royal Institution.
Proc. R. Soc. = Proceedings of the Royal Society.
Quart. Journ. = Quarterly Journal of Theoretical and Applied Meteorology.
Rep. Brit. Ass. = Report of the British Association.
Sitz. Akad. Wien=Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien.
Wied. Ann. = Annalen der Physik (reeks van Wiedemann).
Zs. ges. Erdk. = Zeitschrift für die gesammte Erdkunde.
Zs. phys. chem. Unterricht = Zeitschrift für den physikalischen und chemischen Unterricht.

De litteratuur uit Ruskin is aangehaald naar de Library Edition (London 1903-1912); de Romeinse cijfers zijn de nummers der delen.

Verwijzingen naar ‘de Natuurkunde van 't Vrije Veld’, eerste of tweede bundel (laatste uitgave), zijn voorafgegaan door de cijfers I of II.

Woordenlijst.